ZITO

大师写给你的
科学通识课

（套装共6册）

通俗天文学 / 物种起源 / 自然史 / 几何原本 / 从一到无穷大 / 相对论

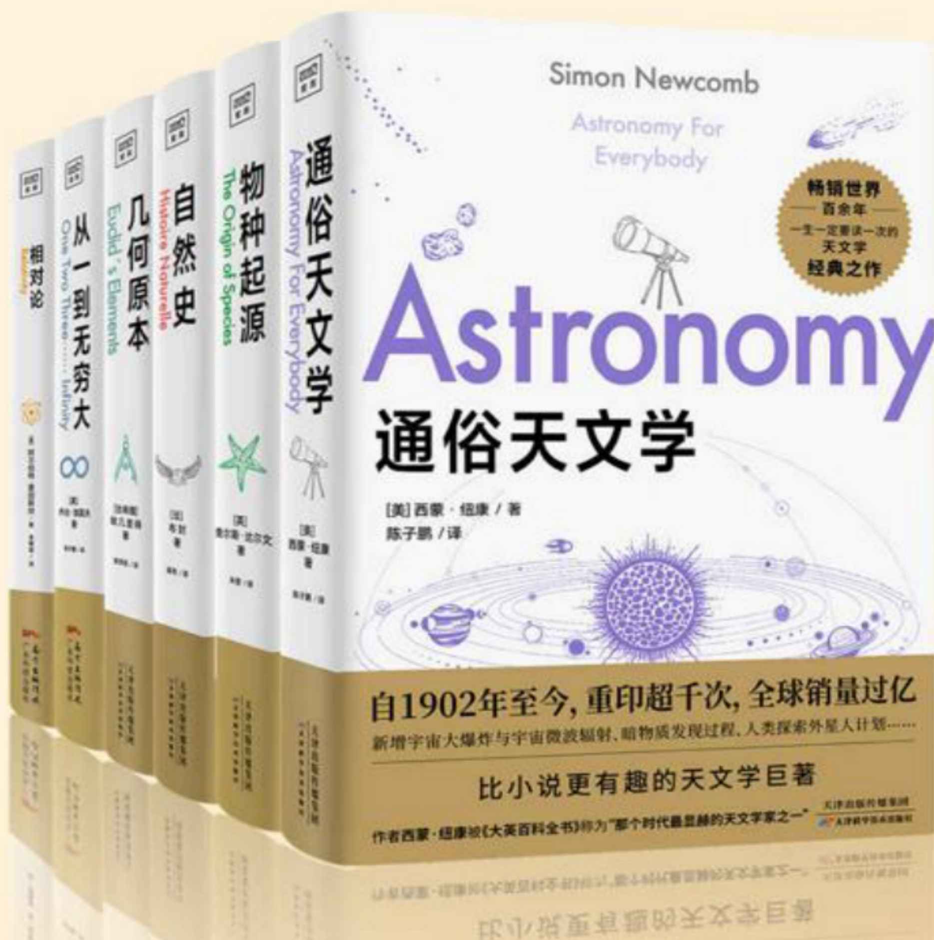
VISIT...

LANZAROTE Caliente.COM

ZITO

大师写给你的
科学通识课

（套装共6册）



通俗天文学 / 物种起源 / 自然史 / 几何原本 / 从一到无穷大 / 相对论

总目录

通俗天文学

物种起源

自然史

几何原本

从一到无穷大

相对论

Simon Newcomb

Astronomy For Everybody

畅销世界
百余年
一生一定要读一次的
天文学
经典之作

Astronomy
通俗天文学

[美] 西蒙·纽康 / 著
陈子鹏 / 译

自1902年至今，重印超千次，全球销量过亿

新增宇宙大爆炸与宇宙微波辐射、暗物质发现过程、人类探索外星人计划……

比小说更有趣的天文学巨著

作者西蒙·纽康被《大英百科全书》称为"那个时代最显赫的天文学家之一"

天津出版传媒集团
天津科学技术出版社

目录

第一章 天体的运行
星辰概况
天空万象
时间和经度的关系
怎样确定天体的位置
地球的周年运动及其影响
第二章 望远镜
折射望远镜
反射望远镜
折反射望远镜
望远镜照相术
第三章 太阳、地球和月球
太阳系的概况
太阳
地球
月球
月食
日食
第四章 行星及其卫星
行星的轨道及其特点
水星
金星
火星
小行星群
木星及其卫星
土星及其系统
天王星及其卫星
海王星及其卫星
曾经的大行星冥王星3
太阳系的比例尺
引力和行星的称量
第五章 彗星和流星

彗星
流星
第六章 恒星
星座
恒星的本质
恒星的距离
恒星系统
星云
第七章 星系和宇宙
银河系
河外星系
膨胀的宇宙
大爆炸宇宙学
微波背景辐射
宇宙的组成
宇宙的结构
宇宙的演化
第八章 探索地外生命
不明飞行物UFO
地球生命之源
探索太阳系
探索银河系

第一章 天体的运行

星辰概况

在进入我们要讲述的主题之前，先来游览一番我们赖以生存的空间，这样更有利于我们简单地了解这个世界。展开你的想象，幻想自己从宇宙之外的一个点观察，而这个点需要在非常遥远的地方。想清楚地得到“遥远”这一概念，我们可以用光速进行测量。众所周知，光每秒的疾行速度大约为30万千米，也就是说，在钟表的两声“嘀嗒”之间，光就可以围绕地球环行七圈半。如果光到这个点需要行走100万年的话，那么我们选定的观察点就比较合适了。在这个遥远的点上，我们将处于完全黑暗之中，环抱我们的只有毫无星光、漆黑一片的浩渺天空。但是，有一个方向显露着它的特别，我们可以在那里看到一大片微弱的光，就像黎明前的一缕曙光，又犹如一片微云，占据着天空的一部分。其他方向似乎也有同样的斑驳光影，但并不是我们现在要讨论的。前面说到的那片光，那片“宇宙微光”才是我们的兴趣所在。飞向它，该用多快的速度可想而知，至少要比光速快100万倍才可能在一年之内到达那里——当然，这仅仅是一个思维游戏，事实上没有任何东西可以超越光速——我们离它越近，它在黑暗天空中就展开得越大，直至覆盖了天空的一半，仅余我们身后的一片漆黑。

在到达这一阶段之前，我们可以看到在那片光雾之中出现了许多闪烁着珍珠般光亮的小点。继续向前飞行，这样的光点愈渐增多，不断地与我们擦肩而过并远远消失在身后，更多新的光点迎面而来，如同乘客在飞驰的列车上看到窗外不断掠过的风景与房屋。于是，身处其中的我们逐渐发现，这些光点就是夜晚看到的散布在天空中的星斗。如果我们用之前预想的超高速度穿越整片光云就会发现，除了散布在黑丝绒般的空中的各种色彩和形状的光雾与光云外，其他什么都没有。

但是，我们并不会急匆匆地穿越美丽的光云，而是先选择一颗星星，将我们的速度减缓，从而可以仔细地观察它。这只是一颗小小的星

星，随着我们接近，它变得越发明亮起来。一段时间之后，如暗夜烛火；又一段时间之后，似乎可以映出影子；再过一段时间，它的光已经可以照亮书本了；又过了一段时间，星星的亮光耀眼夺目，热力如太阳一般。是的，它就是太阳！

接下来，我们再选定一个位置，对于我们刚刚的旅程而言，这个位置就在太阳的旁边，不过按普通的计量单位计算却已经在几十亿千米之外了。现在，我们仔细环顾四周，便能看到八颗如星星般的光点远近不同地分布在太阳周围。如果我们长时间观察这些光点，就会发现它们都在围绕着太阳运行，且绕行一周的时间长短不一，有的只需3个月，有的却要165年。这些光点与太阳距离的远近也有着巨大差异，最远的一颗比最近的一颗远大约80倍。

这些如星星般的东西就是行星，只要我们认真观察就会发现它们与恒星的不同——它们都是不透明的黑暗物体，不发光，只能借助太阳的光。

我们接着观察其中一颗吧。根据它们距离太阳远近的次序，我们选择了第三颗行星。从上方接近这颗行星——也就是从它与太阳的连线成直角的地方，越靠近，它就变得越大越明亮。当距离非常接近时，它看起来就像半轮明月——一半在太阳的照耀下异常明亮，另一半则隐于黑暗之中。再接近一些，被太阳照亮的部分持续扩大，并呈现出斑驳的光点。逐渐再扩大一些，斑驳的光点就化成了海洋和陆地，大约有一半表面被云遮住而看不到；隐在黑暗中的那部分，也呈现出一些不规则分布的明亮斑点，闪耀着如钻石般的光芒，这是人类在地球上的杰作——城市灯火。我们关注的这个表面在眼前不断延展，慢慢覆盖了越来越多的天空，直到最后我们看出这就是全部世界。我们落在上面，回到了地球。

上文讲述的这些，让我们了解到，飞越天空时凭肉眼看不到的那个点，当我们接近太阳时，它就成为一颗星；更接近一些，会发现那是一颗不透光的球体；最后，它成了我们现在居住的地球。

这趟想象的飞行旅途让我们明白了一个重要的事实：夜空缀满的星星大多数都是恒星，都是太阳。换句话说，太阳只是其中一颗恒星。相

比之下，太阳还是同类恒星中较小的一颗，有很多恒星发出的光和热是太阳的几千甚至上万倍。倘若仅从恒星固有的内在价值来评价群星，那么看起来光芒万丈的太阳着实没有足以超越其亿万同类的杰出方面。我们之所以强调太阳的重要性以及它在我们眼中的伟大程度，都源自我们与它之间一种偶然的关系。

以上就是我们对这一伟大宇宙星辰系统的描述。从地面上看到的现象与想象飞行中的后半段看到的类似，天空中散布的繁星正是我们想象飞行中见到的那些星辰。我们从地面的位置仰望天空，与我们在遥远星空中的某一点上观测天空，其最大的区别就在于太阳和行星所处的突出位置。白天，太阳的万丈光芒遮蔽了漫天星辰。假设我们能在更广阔的区域截住太阳的光芒，就能看到星辰日日夜夜在空中闪烁。这些天体围绕在我们周围，恍然间地球就好似巍然立于宇宙中心，而这恰好符合我们祖先的猜想。

什么是宇宙

我们可以把在天空中看到的与在前面了解到的宇宙最大限度地联系起来。我们称宇宙空间物质的存在形式为天体，天体可以分为两类：一类由万千星星组成，它们的排列方式和外观与我们前面讲的一样；另一类则以一颗星星为核心，其他星星受它的某种力量影响而围绕它，这是所有天体中对我们来说最重要的一类。以太阳为中心主星，许多小星星环绕太阳而构成的一个星群被称为太阳系。太阳系有一个主要特征——与宇宙中众多星辰间令人惊叹的距离相比，它的范围实在太小了。以我们现在的了解，太阳系周围的辽阔空间什么都没有。即便我们可以从太阳系的一边飞越到另一边，并不会缩短前方的星星与我们的距离；即使到了太阳系的边缘，我们看到的星座形状也与从地面上看到的完全一样。

天体的大小和距离可以帮助你描摹出宇宙大致的样子，但我不想在这里列举太多数字，我们不妨来做一个宇宙模型，或许更有助于我们建立起概念上的认识。首先，在这个宇宙模型中，我们把居住的地球设想为其中的一粒芥子，对照这个比例，月球就只是仅有芥子直径1/4大小的一粒微尘，位于距离地球2.5厘米远的地方。我们再用一个大苹果来表

示太阳，把它放在距离地球12米远的地方。至于其他行星，大小各不相同，从肉眼不可见的微尘到一粒豌豆都有，它们与太阳之间平均有着4.5米到360米的距离。我们可以想象一下，这些小东西开始围绕太阳慢慢旋转，如我们前面所讲，它们旋转一周所用的时间也不同，从3个月到165年不等。芥子（地球）每年围绕大苹果（太阳）转一圈，月亮会像好朋友一样陪着它绕大苹果（太阳）旋转一圈，同时，月亮还会绕着芥子（地球）旋转，一个月旋转一圈。

按照这个比例可以计算出，我们做的太阳系模型可以平放在2.6平方千米范围之内。在这个范围之外，即使我们能飞越比整个美洲大陆还宽广的距离，也看不到任何东西，偶尔只有一些彗星散布在模型边界。在更遥远的地方，我们还会碰到一颗最接近的恒星，这颗恒星就像我们的太阳，同样可以用一个苹果来表示。再远一些，还有这样的星系分布，但它们之间的距离基本和太阳与最接近它的恒星的距离一样。不过，按照我们的模型比例，在地球这么大的地方，能容纳下的也只有两三颗星星。

由此可知，在之前设想的宇宙空间中飞行时，像地球这么小的东西很容易被我们忽视，即使仔细搜寻，也不一定能够找到它。我们就好比在密西西比河谷上空飞行的人，想看清楚美洲大陆某个地方的一粒芥子。即使是那个代表光芒万丈的太阳的“大苹果”，也完全可能被忽视，除非它刚好离我们很近。

天空万象

星辰之间的距离太过遥远，仅凭我们的肉眼很难对宇宙的大小有一个清晰的认识，即便脑洞大开、充分想象也估算不出我们距离这些天体究竟有多远。如果我们能够通过眼睛发现星辰之间的距离，能够一眼看到恒星和行星表面的特征，那么宇宙的秘密早在人类开始对天空进行研究时就被发现了。只要稍加思考就会明白，如果我们站在距离地球足够远的地方，例如在地球直径1万倍的高空，我们将看不清地球的大小，在太阳的照耀下，只能看到一个一闪一闪的小点，与天上的其他星星一

样。古人应该想象不出这样的距离概念，因此，他们一直认为所见的天体与地球截然不同。哪怕到了现代，我们仰望天空时，仍然不敢相信恒星比行星遥远千百万倍这个事实。看起来，所有星星似乎都分布在同一片天空。我们必须运用逻辑学和数学的原理，才可以真正了解天体真实的分布和距离的远近。

就是因为这样，我们才对天体之间距离的遥远没有认知，也就难以在心中形成与它们真实关系相符合的图像。 所以，读到这里，我提醒你们一定要集中注意力和想象力，如此，我才能够把这些复杂的关系尽可能用简单的方法表达出来，这对大家理解星辰的真实情况大有助益。

假设我们能将地球从脚下移走，让自己悬浮在半空中，就会看到太阳、月亮、行星和恒星环绕在我们周围，上下左右、东西南北都有。除此之外再也看不到其他别的什么了，而且如同我们之前所讲，这些天体看起来都与我们保持着相同的距离。从中心点以同样距离向周围分散在各个方向上的所有点，都一定位于同一个球面上，而所有天体就好似被安置在这个球面上一样。

天文学研究的对象是天体相对于我们的方位，我们看到的球体就仿佛真实存在于天文学中，这就是所谓的“天球”（celestial sphere）。在这种假设的基础上，地球不在我们脚下了，那么天球上的所有天体就都会停止运行，时间一天天过去，恒星停留在那里似乎丝毫不动。但只要认真对行星进行观察，我们便会发现，它们在几天或者几周内（观测的时间由各自情况而定）在悄悄地围绕太阳运行。这种情况并不能被马上发现。我们首先想到的，是这个天球由什么构成，那些天体又为什么可以固定在它的内部表面。古人应该也考虑过这个问题，他们将这个观点修正得更符合实际情况，也由此想象出许多天球嵌套在一起，从而形成天体的不同距离。

好了，让我们再把地球搬回来吧！接下来要考验一下大家的想象力，地球与天空的大小相比，仅仅是一个小点；但如果我们将它放在适当的位置上，它的表面就会遮挡住我们眼中的一半宇宙。就好像我们把一个有虫子的苹果放在房间，在小虫的眼中看到的就是被苹果挡住一半的房间。地平线上一半的天球是可以看到的，我们称它为“可见半

球”（visible　hemisphere）；而另一半在地平线下被地球挡住的天球，则被称为“不可见半球”（invisible　hemisphere）。当然，如果你想看到另一半球，通过环球旅行改变你在地球上的位置就可以了。

了解了前面这些情况，我要再次提醒大家集中注意力了。你们一定知道地球不是静止的，而是围绕着中心轴时刻转动，这样的旋转会让整个天球看起来似乎是在自东向西转。地球的这种自转和由此导致的星辰视觉转动被称为“周日运动”（diurnal　motion），因为它们是一日一周的运动。

星辰的每日视转动

接下来我们再来了解一下，地球自转这一简单概念与由此引起的天体周日视运动表现出的复杂现象之间的联系。天体周日视运动因观察者在地球上选择的纬度不同而不同。

我们首先从北纬中部地区开始观察。为了更好地得到答案，我们还是先想象出一个天球，一个内部空间足够大的空球，大小与摩天轮类似，直径约10米。如图1–1所示，这个空球被固定在转轴的两点（P和Q）上，从而使空球可以倾斜转动。O是中心点，上面放着一个平面盘子NS，我们就位于这个平面盘子上。星座则位于空球内部，并分布于整个内表面，空球的下面一半也有星座，只是被平面盘子遮住，我们无法看到。这个平面盘子表示地平线。

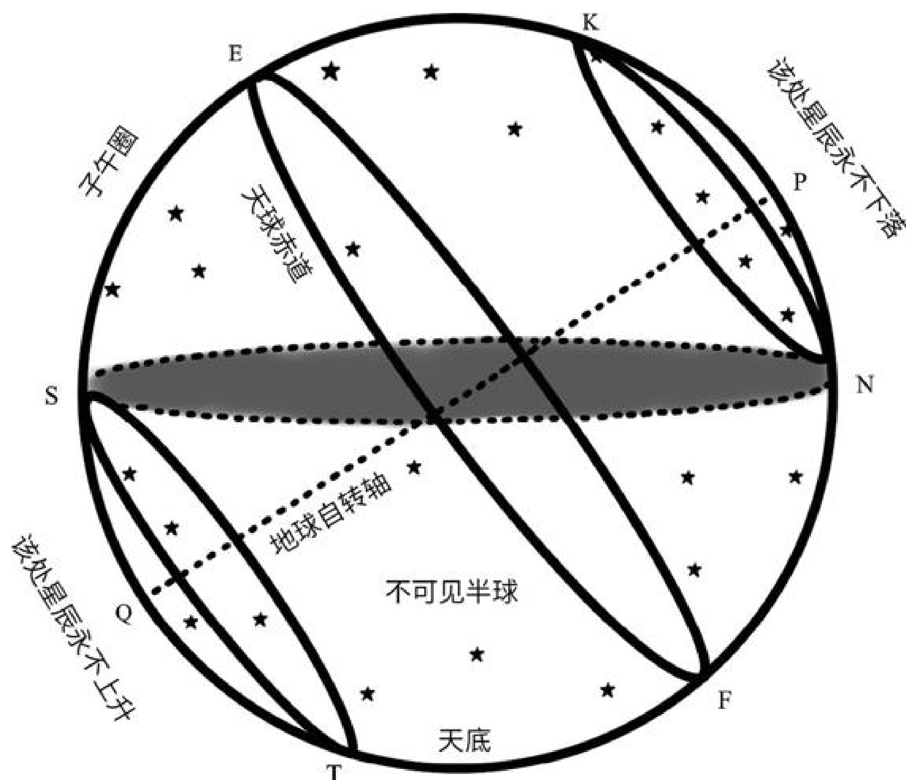


图1–1 想象中的天球

我们让这个大空球围绕轴点转动起来，就会看到轴点P附近的星星也围绕着P点旋转。K点到N点这个圆周上的星星会随着空球的旋转擦到平面盘子的边缘。而那些距离P点更远的星星会掉落到平面盘子的下面，掉落的远近程度与它们到P点的距离有关。靠近EF圈的星星则在P点和Q点中间，当空球开始旋转，它们附近的星星一半在平面盘子的下面，一半在平面盘子的上面。而S点到T点这个圆周上的星星却不能转到平面盘子上面来，也就是说，我们永远看不到它们。

天球在我们眼中就是这样一个球体，只是无穷大而已。看起来它似乎一直在围绕天空中的一点不停旋转，太阳、月亮和星星都随其转动。星辰之间保持着它们的相对位置，如同固定在旋转的天球上。如此也就意味着，如果我们想在夜间的任何时刻为星星拍摄一张照片，那么只要我们掌握了正确的方位，它们在其他时间还会处于照片中相同的位置。

继续回到图1–1，我们将转轴上的P点称为“天球北极”（north

celestial pole）。对于居住在北纬中部的人们（我们大部分人都住在这里），“天球北极”是在北天上，几乎接近顶点和北方地平线的中心。我们居住的地方越靠南，北极也就越靠近地平线，它离地平线的高度恰好与观测者所在地的纬度一致。距离北极最近的一颗星就是我们常说的北极星（Polaris），关于如何寻找它，我们将在后面详细介绍。如果是一般的观测，北极星几乎一直停在那里，并没有怎么移动。它与北极的夹角也仅有1°多一点，但我们现在不用去讨论这个差异。

正对着天球北极的是“天球南极”（south celestial pole），它位于地平线的下方，与北极到地平线的距离相同。

显而易见，从我们所处的纬度看到的周日运动是倾斜的。当太阳从东方冉冉升起时，它看起来并不是从地平线上一直升起，而是沿着斜向南方与地平线呈一个锐角来运动。所以，当它落山时，运动的轨迹也是以同样倾斜的角度向地平线靠近。

假设我们手中现在有一个很大的圆规，大到可以接近天空。我们把圆规其中一只脚固定在天球北极，另一只脚则放在天球北极下面的地平线上。固定在天球北极那只脚保持不动，用另一只脚在天球上画出一个完整的大圆圈。这个圆圈的最低点正好与地平线相连，从我们居住的北纬地区看过去，它的最高点已经快要接近天顶了。这个圆圈上面的星星是永远不会坠落的，看起来它们只是每天围绕北极转一圈，因此也被称为“恒显圈”（circle of perpetual apparition）。

在这个圆圈以外，靠近南面远处的星星升起又落下，但是越靠南的星星，它们每天在地平线上走过的路程就越少，直到最南方的一点上，几乎就看不到了，星星只会在地平线上一闪而过。

从我们所在的纬度看过去，更靠南的星星根本不会出现。这些星星都在一个“恒隐圈”（circle of perpetual occultation）内，这个圈以天球南极为圆心，与恒显圈以天球北极为圆心一样。

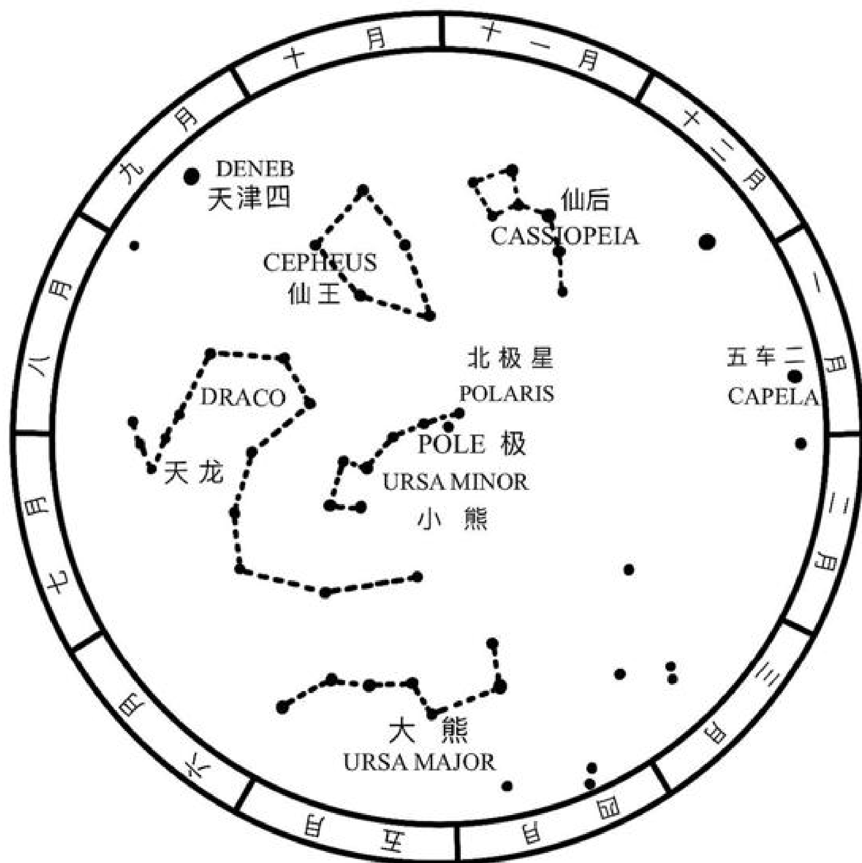


图1–2 恒显圈内北天主要星座

我们来看一下图1–2，这是一个可以从北方观察到的恒显圈内北天上的主要星座。如果将适当的月份转到对应的顶上，我们就能在当月晚上的八点左右看到北天中的星座。图中还标出了寻找北极星的方法，就是利用大熊星座七颗星星（Ursa Major，俗称北斗七星）中的“指极星”（Pointers）的延长线，可以在其所指的方向上找到北极星。

现在，让我们改变角度看看会发生什么变化，如果我们是向赤道的方向旅行，那么地平线的方向会随之改变。在途中，我们还将发现北极星渐渐下落。我们距离赤道越来越近，北极星也将越来越接近地平线，我们到达赤道时，北极星就到达地平线上了。我们之前讲到的恒显圈也自然会越来越小，在我们到达地球时，恒显圈完全消失在赤道上，南北方向的地平线上是天球的两极。这里的周日运动与我们讲到的大不相

同。太阳、月亮和星辰一同升起。如果有一颗星刚好从正东方升起，它一定会经过天顶；天上升起来的偏南的星星，一定将经过天顶南边；而从偏北升起的星星自然会经过天顶北边。

继续向南，到达南半球。我们就会发现，虽然太阳是从东方升起，通常却经过天顶的北面横过中天。南北两半球最主要的不同在于：既然太阳是经过天顶的北面横过中天，那么太阳的视运动就与我们所处的地方不同，并不是和钟表上的时针运动方向一样，而是恰好相反。在南纬中部地区，看不到我们熟悉的北天星座，它永远在地平线以下，天空中都是我们没见过的新的南天星座。其中一些还以美丽壮观著称，例如南十字星座。事实上，人们通常认为南天上的星座比北天上的更美丽、更多。但这一观点已被证实并不准确。经过对这些星辰的仔细研究和计算，我们发现南天和北天拥有的星星数量基本相同。之所以会产生这样的错觉，或许是因为南半球的天气相对晴朗，南半球非洲大陆和美洲大陆的空气中烟雾含量比北半球少，加之气候干燥，因此南天上的星星看起来更为繁多。

我们在前面讲过的北天星辰绕着天极的周日运动同样适用于南天。不过，南天极没有南极星，所以无法辨别天球南极的位置。尽管南天极周围分布着一些小星星，但远不如天空中其他位置的星星那样密集。南半球当然也是有恒显圈的，并且越向南圈越大。这进一步说明，南天极周围也围绕着一圈永远不会坠落的星星，并一直围绕南天极旋转，旋转的方向也和北天极的星星相反。相对来说，当然北半球也有其恒隐圈，北极附近的星星就在这个圈内，这些星星在我们所处的北纬上也是永不坠落的。我们只要越过南纬20°，就完全看不到小熊座（Ursa Minor）上的任何天体了，再向南，大熊星座也只在地平线上露出一小部分。

如果我们的旅行继续向南，就将告别星辰的升落，因为那些星辰围绕天空的运行轨迹是平行的，轨迹的中心——也就是南天极，与天顶重合。这种情况也同样发生在北天极。

时间和经度的关系

众所周知，地球表面一条由北向南经过某地的线被称为该地的子午线。再准确一点，地球表面的子午圈是连接南北两极的半圆。这个半圆从北极向各个方向扩散，从而让我们能够画出经过任何地点的子午线。国际公认的计算经度的起点是格林尼治皇家天文台的子午线，大多数地区的时间也是以此为据设定的。

与地球上的子午圈相对应的是天球上的子午圈（就是地球上的子午圈在天球上的投影）[1]，天球上的子午圈起始于北天极，通过天顶，并在最南的一点与地平线相交，再向南最后到达南极形成半圆。地球是围绕地轴旋转的，天球上的子午圈与地球的子午圈也随之一起转动，这样，天球上的子午圈在一天内能运行经过整个天球。而在我们眼中，天球上的每个点在一天之内都会经过子午圈。

太阳经过子午圈的时刻，就是我们惯称的中午。在现代计时工具还没有出现之前，我们的祖先是根据日照的高低来制定时间的。可是，由于黄道倾斜角和地球绕日轨道的偏心率的影响，太阳连续两次经过子午圈的间隔时间并不完全相同。换言之，如果计时工具准确，那么太阳从子午圈经过的时间有时会是12点之前，有时则是12点之后。只要理解了这个道理，那么区分视时（apparent time）和平时（mean time）就不再是一个难题。视时指依据太阳测定的每日时间，长短不等；平时则是依据钟表设定的时间，长短完全相等。两者之间产生的差别就是我们所称的时差（equation of time）。它们之间相差最多的时候出现在每年11月初和2月中旬。11月初，太阳会在12点前的16分钟经过子午圈；2月中旬，则在12点14分至15分之间经过子午圈。

为了确定平时，天文学家们以他们的非凡才智构想出平太阳（mean sun）这一概念，平太阳一直沿着天球赤道运行，它每次经过子午圈的间隔时间完全相同，所以有时会在真太阳之前，有时则在真太阳之后。根据构想出来的平太阳，就能确定每天的时间了。如果可以不考虑真实情况，只通过视觉上的景象来说明这个问题会更容易。假设地球静止不动，平太阳绕地球旋转，慢慢经过各地的子午圈。那么，我们可以想象一直围绕世界运行的就是“中午”这一时刻。在我们所处的纬度上，它的速度只有每秒300米，换句话说，如果我们所在的地方是中午，1秒钟后，向我们西边300米远的地方即是中午；再过1秒，再向西300米的地

方就是中午……以此类推，经过24小时，中午会再次回到我们所在的地方。这种情况最明显的结果就是：任意两个在不同子午圈上的人，绝对不会处于同一时间。当我们向西走时，我们会觉得当地时间比我们的手表时间更慢；而向东走，这种情况又会相反。这种有区别的时间变化就被称为地方时（local time）。

标准时

由于地方时存在的差异，给旅行者造成了极大的不便。以前，所有铁路运营者都有自己的子午圈，铁路线上的列车都按照自己的时间运行，但旅客们会按自己的钟表显示时间安排行程，经常由于不了解自己的钟表时间与铁路时间的差距而误了火车。直到1883年，科学家们才制定出我们现在使用的标准时间制度。这个时间制度规定，每15°（太阳每小时经过的地方）为一个标准的子午圈，中午经过标准子午圈时，两边7.5°相加的地区都是中午，这就是“标准时”（standard time），而标注这些地带的经度以经过格林尼治天文台的子午圈为起点。费城在经度上与格林尼治天文台相距约75°，时间为5小时，更准确地说是5小时1分。这样一来，美国东部各州的标准子午圈就位于费城东面一点。当平正午（mean noon）经过这个子午圈时，向西一直到俄亥俄州都算是中午12点。一小时之后，密西西比河流域是12点。再过一小时后，落基山脉地区是12点。再经过一小时，太平洋沿岸是12点。由此可知，美国有四种时间：东部时间、中部时间、山地时间和太平洋时间，依次相差一个小时。按照标准时间制度，旅行者在太平洋和大西洋之间穿梭跨越时区时，每次只需将钟表调快或者调慢1小时，就可以与他所在时区内的时间相同了。

中国在1949年以前，设置了中原、陇蜀、新疆、长白和昆仑五个时区，不同时区内的时间不同。中华人民共和国成立后，将首都北京所在的东八区确定为全国标准时间，统一为“北京时间”。

通过这种时间的差别，我们可以判断一个地区的经度。如果一个位于纽约的观测者在某颗星星经过当地子午圈时向芝加哥发送电报，这个时间会被两个地方记录下来。当这颗星星到达芝加哥的子午圈时，另一位发报者也按下电报发出键。那么，这两次电报的时间间隔就是这两个

地点相差的经度。

还有一种方法可以确定经度，即身处两地的观测者分别将各自的地方时向对方报告，这样得出的结果与前面我们假设的一样，两地的时间差就是两地相差的经度。

不过，我们必须记住，太阳从东边升起、由西边落下依据的是地方时，而不是标准时。因此，日历中标注的日出和日落的时间并不能确定钟表的标准时，但正好处于标准子午圈上除外。地方时和标准时的差异是，当我们在向东或向西旅行时，地方时不断发生改变；而标准时却只在我们每经过某个时区的边界时，跳过1小时。

日期在什么地方改变

“午夜”和“中午”相同，不停地围绕地球旋转运行，陆续经过每个子午圈。每经过一个子午圈，就代表这个子午圈对应的地方开启了新的一天。假设它经过某个地方时正好是星期一，那么当它再次经过时就是星期二了。所以，肯定存在一个在星期一和星期二交界处的子午圈，又或者说，存在一个两天的临界点。这个划分日期的子午圈被称为“国际日期变更线”，它是基于人们的习惯和应用的便利性来划定的。当人们向东西两个方向迁徙时，会将按照自己计算日期的方式一同带去。直到向东而去的人和向西而去的人在某处相遇，才发现彼此之间的日期相差了一整天，向西去的人还在过星期一，而向东行的人已经是星期二了。美国人到达阿拉斯加时就遇到了这样的情况。俄罗斯人向东行走到了阿拉斯加，美国人向西走到达该地。在同一个地方，美国人的时间还在星期六，而俄罗斯人已经在过星期日了。这样就产生了一个问题：当地居民想去希腊的教堂做礼拜，应该如何计算日期呢？是遵照新日期的计算法还是旧日期呢？这个问题被圣彼得堡教会的主教知晓后，请来了普尔科沃天文台（Pulkovo Observatory，俄罗斯国家天文研究机构）的负责人斯特鲁维。斯特鲁维写了一篇报告，认为美国的日期计算方法更为准确，于是最终将日期的计算方法统一。

目前规定的国际日期变更线是指与格林尼治天文台正对的子午线。这条界线恰好位于太平洋中央，只经过亚洲东北角以及斐济群岛的一部

分陆地。这样的地理环境很有利，避免了因国际日期变更线穿过一个国家内部造成的严重不便。如果日期变更线从一个国家内部穿过，那么这个城市的日期就会与相邻城市的日期相差一天，甚至同一条街道两边的居民会过着不同的日期。但是，如果日期变更线在海洋里，就可以避免这种不便的发生。日期变更线并不是严格意义的地球上的子午圈，它可以曲折迂回以避免前面讲到的不便。因此，即使与格林尼治呈180°的子午圈正好从查塔姆群岛及其邻近的新西兰之间穿过，两地居民的时间依然可以一致。

怎样确定天体的位置

为了完整了解天体的运作和观测星星的位置，我将在这一节的内容中引入一些专业名词术语，并对它们进行解释说明。如果你只是想简要了解天空现象，那么这一节的内容并不重要。我想邀请一些希望深入学习的人，来和我一起研究在“天空万象”中讲述的天球。如果大家已经忘记，那就让我们重新回到图1–1，再来看看地球和天球的关系：一个真实存在的球体是地球，我们正站在它的表面，它带着我们每天不停地旋转；另外一个则是看起来存在的天球，它在遥远的地方包围着地球。虽然这是一个并不存在的大球，但我们一定要在脑海中想象出来，这样才能知道去什么地方寻找天体。需要注意的是，我们身处天球的中心，因此看到的天球上的东西仿佛都在球的内部表面上，而我们在地球的外部表面上。

这两个球上的许多圈点之间都有类似的关系，也是我们提到这两个球的原因。我们在前面已经说过，地球的转轴指出了我们的南北极，又向两个方向延伸横穿长空，指出了天球的南北极。

我们知道环绕着地球的赤道与南北两极的距离相等。同样，天球上也有一条赤道环绕着天球，与南北天极各呈90°。假如我们能将它在天上画出来，就可以发现它的位置昼夜不变。我们需要更准确地想象出它的形状。它在正东和正西两个点上与地平线相交——实际上就是3月（春分）和9月（秋分），太阳在地平线上的12小时内，周日运动在天上移

动的那条线路。从美国北部的各州来看，天球赤道正好穿过天顶与南方地平线之间的正中，越向南越接近天顶。而中国的大部分地区也是如此。

正如地球上有平行于赤道且环绕地球赤道南北的纬度圈一样，天球上也有两个平行于天极的圈子。地球上的纬度圈越靠近两极越小，天球上的纬度圈也是如此。

我们知道，地球上的经度是根据通过该地从北极到南极的子午圈测量出的，而这个子午圈与经过格林尼治天文台的子午圈形成的角度就是当地的经度。我们可以在天球上找到类似的东西。想象一下，一些在天球上的北天极和南天极之间朝各个方向散开的线，与天球赤道呈直角正交，如图1–3所示，这些圈被称为“时圈”（hour circle）。我们把其中之一称为“二分圈”（equinoctial colure），图1–3中也已注明，这条线正好经过春分点，这个内容我们将在下一节讨论。二分圈在天球上的作用与格林尼治子午圈在地球上的作用相同。

天球上一颗星星的位置可以与地球上一座城市的位置一样，用经纬度来确定，不过使用的名词大不相同。天文学中，天球上与地球经度相当的被称为“赤经”（right ascension），而与地球纬度相当的被称为“赤纬”（declination）。于是就有了下面这些定义，读者们一定要牢记：

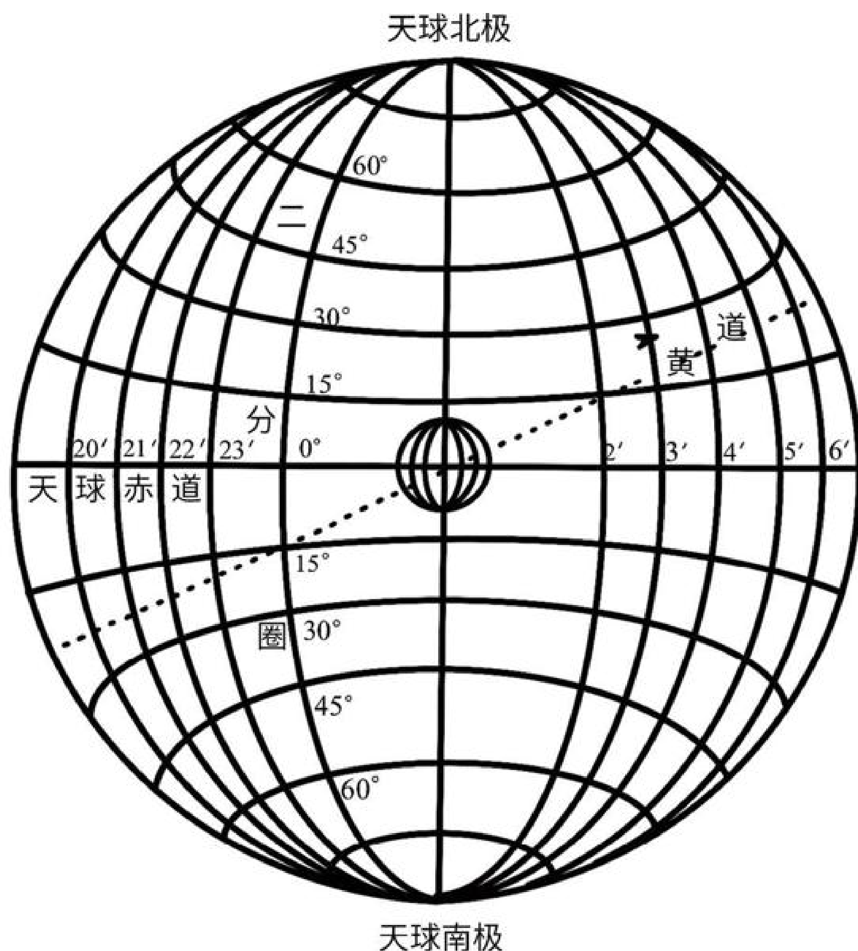


图1–3 天球经纬示意图

一颗星的赤纬指的是它距离天球赤道在南北方向的视距。图1–3中的星星正在赤纬北25°。

一颗星的赤经指的则是经过这颗星的时圈与经过春分点的二分圈形成的夹角。图1–3中的星星正在赤经3时上。

天文学中通常用时、分和秒表示星星的赤经，如图1–3标出的那样；也可以用度数来表示，如同地球上的经度一样。如果想将赤经的时分秒转化成度数，只需乘以15即可。这是由地球每小时内旋转15°决定的。从图1–3中我们还能看出，纬度的相差体现在直线距离上。单位长度在地球上都是相同的，但经度的相差是不一样的，它的直线距离从赤

道向两极逐渐变小。在地球赤道上，每经度相差111.8千米，但在南北纬45°上，相差就只有67.6千米了；再到南北纬60°上，每经度相差已不到56千米；到了两极则减少为0，这是由于各子午圈已经相交于此了。

由此，我们了解到，地球自转的线速度也会遵循这样的规律递减。在赤道上，经度如果相差15°，那实际距离就相差1600千米，地球旋转的线速度为每秒460米；在南北纬45°上，线速度减慢至每秒300米多一些；在南北纬60°上时，线速度就只相当于赤道上的二分之一了；在两极则降为0。

如果将这样的经纬应用到天球上，地球的自转会成为唯一的难题。只要我们不动，就始终保持在地球的某一经度上。但是，由于地球的自转，天球上任何一点的赤经都在不断发生变化，尽管在我们看来是固定不动。天球子午圈和时圈的区别在于，天球子午圈随着地球转动，而时圈则固定在天球上。

地球和天球之间的每一点特性都很相似，地球自西向东绕着它的轴自转，天球仿佛自东向西旋转。假如我们将地球想象为天球的中心，有一根共同的转轴穿过它们，如图1–3所示，我们就能够更清晰地理解它们之间的关系了。

如果太阳也如同星辰那样，在天球上静止，那么我们要找到一颗已经知道赤经和赤纬的星星就不是一件困难的事。不过，由于地球每年会围绕太阳旋转一周，那么每晚相同时刻，天球上太阳的视位置就会发生变化，且永不相同。接下来，我们开始讨论公转产生的影响。

地球的周年运动及其影响

我们都知道，地球不仅绕着自己的转轴旋转，还围绕太阳公转。这种运动令太阳看起来是在众星之间每年环绕天球旋转一圈，我们想象自己是在环绕着太阳运动，就能发现太阳正朝着反方向运动，这样就会看到太阳在比它更遥远的众星之间运动。当然，由于白天看不到星星，所以这种运动难以被轻易发现。但是，如果我们长时间紧盯着西边的一颗

星，就会感觉到这种运动。我们会发现这颗星降落得一天比一天早，也就是说与太阳越来越接近。确切地讲，既然这颗星的位置不变，那么似乎是太阳在逐渐向星辰靠近。地球的周年运动显而易见。

假如我们可以在白天看见星星，看到它们都散布在太阳的周围，情况就会越发明显。再假如我们看到一颗星星和太阳一同升起，那么在一天之中，太阳会远离那颗星星，渐渐向东移去。直到太阳快要落下时，它与这颗星的距离大约等于自身的直径那么远。次日清晨，我们会看到它离那颗星星的距离更远了，大约是自身直径的2倍。图1–4中表示了春分时（3月21日）的这种情况。这种运动月复一月地持续着，等到太阳远离这颗星，绕着天球运行一圈，一年之后将会与这颗星星再次相遇。

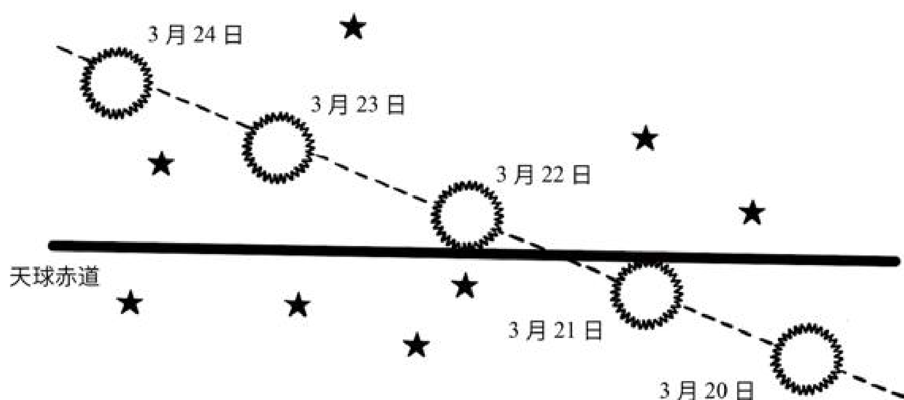


图1–4 太阳在3月21日左右经过天球赤道

太阳的周年视运动

我们再来看图1–5，它表示了地球围绕太阳运行的轨道，遥远的星辰是它的背景。当地球在A点时，太阳处于AM这条直线上，对应到星辰中的M点。而当地球从A点移动到B点时，太阳也就对应到N点，以此类推持续一年。古人应该是很早就注意到太阳的这种周年运动，他们在绘制这种图像时花费了非常大的精力，他们想象出一条绕过天球的线，太阳总是绕着这条线做周年运动。这条线被他们称为“黄道”（ecliptic）。古人发现，尽管不是完全一致，但行星的运动轨迹基本与太阳通常的轨迹相同。他们由此想象出一条把黄道线夹在中间的带子，带子里面包含

了所有已知的行星和太阳，这个带子被称为“黄道带”（zodiac）。他们将这条带子等分为十二宫，每一宫包含一个星座，太阳每个月进入一宫，一年经过十二宫。这就是人们常说的黄道十二宫，它们的宫名与所在的星座相同。这与我们现在知道的情况稍有不同，因为岁差运动在缓慢地起作用，我们将会在后面讲到这一点。

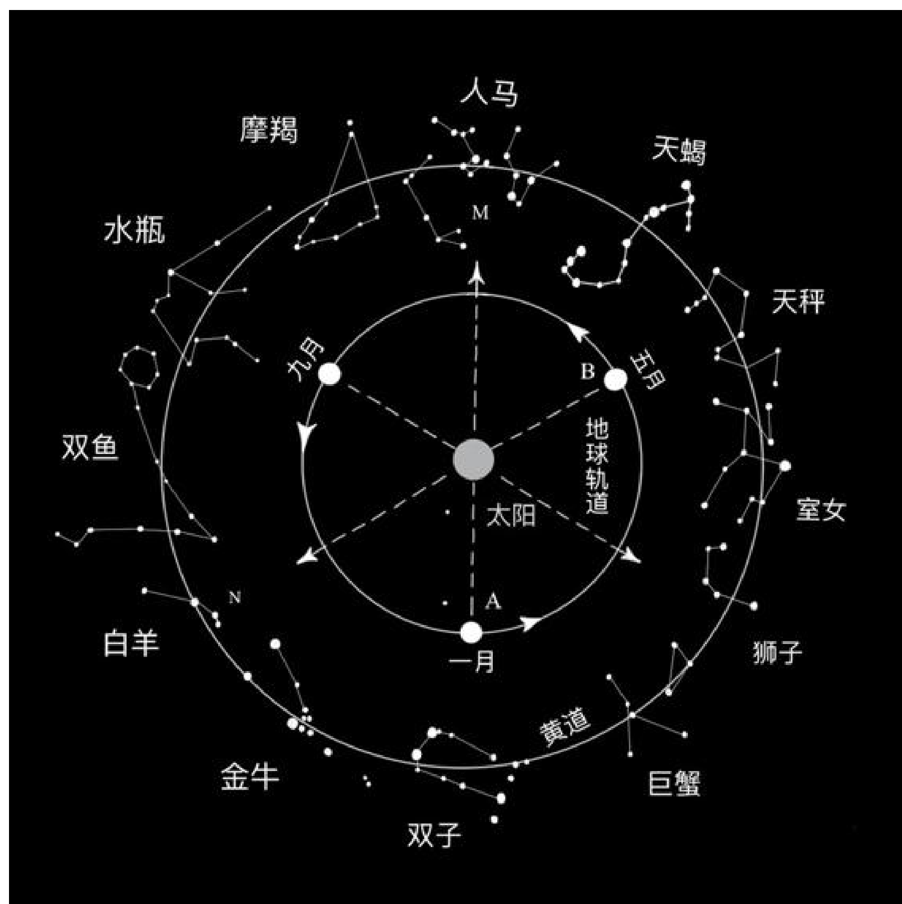


图1–5 地球的轨道和黄道带

如此，我们就能够看出，我们提到过的环绕整个天球的两道圈是通过不同的方法得出的。天球赤道由地球转轴的方向决定，恰好在两个天极的中间嵌入天球；黄道则是由地球绕太阳的运行轨迹而来。

这两道圈并不一样，却在相对的两点相交，大约成23.5°，或者说约为直角的1/4，这个夹角被称为“黄赤交角”（obliquity of the

ecliptic）。为了正确理解这种现象产生的原因，我们必须再说一下天极的问题。依据前面介绍过的内容，我们很容易知道两个天极是由地球转轴的方向决定的，而不是由天上的什么来决定；它们仅是因为天球上相对的两个点正好与地球转轴形成一条直线。天球赤道是两个天极正中间的大圈，这自然也是由地球转轴的方向决定的。

我们现在假设地球绕日运行的轨道是水平的，并且将其想象为一个平盘的圆周，太阳就位于平盘的中心。地球沿着圆周运动，中心恰好也在平盘之上。那么，假如地球的自转轴是垂直的，赤道就一定是水平的，并且与平盘圆周处于同一平面中，地球沿着平盘运动一周，中心始终对着太阳。所以，由绕日运动确定的黄道也一定与天球赤道是同一个圆圈。黄赤交角（黄道倾斜角）形成的原因在于地球自转轴并不是垂直的，而是倾斜了23.5°。黄道和平盘的倾斜角也是23.5°，而这个倾斜就是地轴的倾斜。还有一个与此相关的重要事实，当地球绕太阳旋转时，它的轴在空间中的方向是不变的。因此，地球北极有时靠近太阳，有时又远离太阳。图1–6清楚地展示了这种情况，也就是我们刚刚假设的平盘圆周，地轴向右倾斜，而北极的方向永远不变。

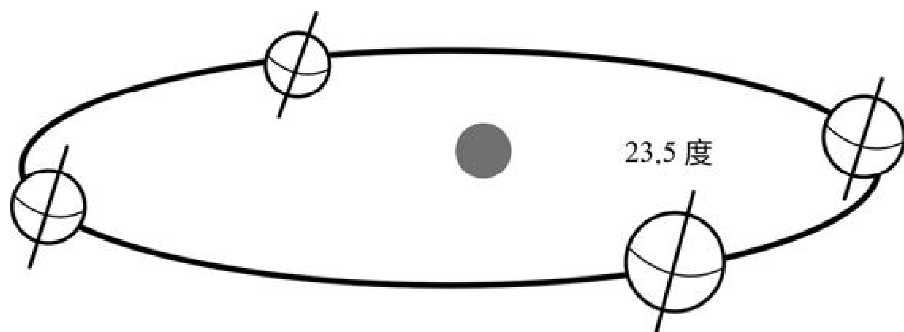


图1–6 黄赤交角示意图

如果不明白黄道倾斜角的影响，我们可以再举个例子，假设在某一个3月21日前后的正午，地球停止了自转，但继续围绕太阳公转。未来的三个月中，我们就会看到图1–7中显示的情况。假设我们在图中望向南天，会发现太阳正在子午圈上，乍看起来似乎是静止的。如图所示，天球赤道自东到西与地平线相交，与前面描述的情况相同，黄道和赤道相交于春分点。接下来再持续观测三个月，我们会看到太阳慢慢沿着黄

道来到夏至点上，那是太阳到达的最靠北的一点，大约在6月22日左右。

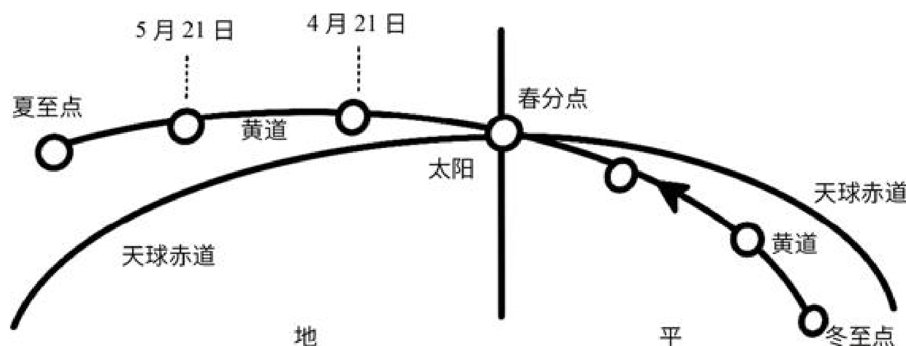


图1–7 春夏间太阳沿着黄道的视运动

图1–7可以让我们观察到太阳在接下来三个月中的运行。经过夏至点后，太阳会沿着它的轨迹逐渐向天球赤道靠近，大约在9月23日（秋分点）左右到达天球赤道。太阳在一年中其余时间的轨迹与其前六个月的运动轨迹相对应。在12月22日（冬至点）到达离赤道最南边的一点；接着又在3月21日（春分点）前后经过天球赤道。不过，这些日期会因闰年出现一些差异。

我们现在可以来总结一下太阳周年视运动中需要注意的几点：

我们从春分点开始观测；

夏至点是太阳运行到最北边的一点之后，开始返回并向南靠近赤道的转折点；

秋分点与春分点相对，太阳在9月23日左右会经过这个地方；

冬至点与夏至点相对，是太阳最靠南的一点。

我们将太阳在两个天极之间通过的这些点与天球赤道呈直角的时圈称为“分至圈”（colure）。太阳经过春分点的二分圈是赤经的起点，而与之垂直的是二至圈。

让我们再来认识一下星座与季节气候以及每日时间的关系。假如太

阳今天和一颗星星同时经过子午圈，那么明天太阳就会在这颗星星东边1°，也就是我们之前讲过的，这颗星星会比太阳早约4分钟经过子午圈。这种情况每天重复，持续一整年，直到二者再次同时经过子午圈。如此一来，这颗星星每年经过天空的次数会比太阳多一次。换句话说，太阳经过子午圈365次，而那颗星星会经过子午圈366次。当然，如果我们选取的是南天的星星，那么它出没的次数则与太阳的相同。

四季

如果地球的自转轴正好与黄道平面垂直，黄道将与天球赤道重合，那么我们就感觉不到四季之间的变化了。这是由于太阳永远都是从东方升起，在西方落下，经年不变。地球上的气温变化也很细微，这是由于1月时地球与太阳的距离更近一些，到了6月就离太阳远一些。但是黄道倾斜了，那么太阳位于赤道以北时（3月21日到9月23日），北半球每天被太阳照耀的时间比南半球长，而且与地面形成的角度也更大。而南半球的情况则恰恰相反。太阳照耀的时间从9月23日到次年的3月21日，比北半球更长。因此，当北半球是冬季时，南半球就是夏季，两个半球的季节恰恰相反。

真运动和视运动的关系

在深入讨论这部分内容之前，我们有必要先了解几个名词。

首先是真运动——也就是地球的运动，其次是视运动——也就是真运动引起的天体视运动。接下来是真周日运动，指的是地球围绕自己的轴自转；视周日运动，指的是地球自转产生的星体现象。真周年运动，指的是地球围绕太阳公转；视周年运动，指的是太阳在众星之间环绕天球运动。

由于真周日运动，地平线从太阳或者星辰上经过。这样，我们就会看到太阳或星辰升起又落下。

地球赤道平面大约在每年的3月21日前后从太阳北边向南边移动，9月23日前后，则从南边向北边移动。所以我们说，太阳3月时从地球赤道经过并向北移动，到了9月又经过赤道并向南移动。

每年6月，地球赤道平面在太阳南边最远的地方，12月则在太阳北边的最远处。我们认为，在第一种情形中，太阳处于北至点；而第二种情形中，太阳处于南至点。

相对于与地球轨道垂直的线，地球的自转轴倾斜了23.5°，所以黄道向天球赤道倾斜的夹角也是23.5°。

夏季时，地球的北半球向太阳倾斜，北纬地区被地球的自转作用带领，旋转一次得到阳光的时间有一大半，而南纬地区得到阳光的时间只有一小部分。于是，我们就可以看到，太阳每天在地平线上的时间超过一半，北半球是炎热且昼长的夏季，而南半球则是寒冷且夜长的冬季。

到了北半球过冬的时候，情况就完全相反，南半球在这个时候倾向太阳，北半球则远离太阳。因此，南半球进入昼长夜短的夏天，而北半球则是夜长昼短的冬日。

上述内容如果用相对性原理解释，会更容易理解。因为宇宙没有中心，那么所有参照物都是相对而言的。

年与岁差

我们常说的“年”的概念，最简单的就是地球围绕太阳公转一周的时间。按前面讲过的，年的长度有两种不同的测量方法：一种是计算出太阳两次经过同一颗恒星所用的时间，另一种是计算出两次太阳经过春分点（或秋分点）所用的时间。如果二分点的位置是固定在众星之间不变的点，那么这两种计算方法得到的结果就完全相同。但是，古代天文学家根据数千年的研究发现，上述两种方法得出的结果并不同，太阳以恒星为起点绕天空转一周会比以春分点为起点绕天空一周多花11分钟。由此我们可以得出，每年春分点的位置会在众星之间不断移动，这种移动被称为“岁差”（precession）。岁差的产生与天球没有任何关系，只是因为地球在绕太阳公转的过程中地轴缓慢移动造成的。

我们假设图1–5中地球一直在围绕太阳旋转，经过六七千年，转动了6000至7000次之后，最终我们发现，地轴的北极并非如图中所示向着我们的右边，而是转到正对着我们的那一方；再经过六七千年，地轴

北极又来到了我们左边；再经过同样的时间，地轴北极将会背对着我们；继续经过同样的时间，地轴北极会回到最初的位置，这个过程大约需要2.6万年。由于天极由地轴的方向决定，因此地轴方向的变化会带动天极在天空中慢慢转出一个半径为23.5°的圆圈。这时，北极星与北极的距离是1°多一点。但是，北极正慢慢靠近北极星，200年后就会逐渐远离北极星。1.2万年后，北极将进入天琴座（Lyra）中，距离这个星座中最亮的织女星（Vega）大约5°。古希腊时期，航海者并不认识北极星，因为那时的北极星距离北极点10°至12°，位于北极星和大熊星座之间。那时的航海者只能根据大熊星座来确定航向。

这样一来，既然天球赤道是在两个天极正中间的大圈，那么它在众星中的位置也一定会有相应的变化。这种变化在过去2000年中产生的影响可以在图1–7中看出。因为春分点是黄道和天球赤道的交点，所以它们也会在这种变化的影响下发生变化。这就产生了岁差。

我们前面讲到的两种年，一种被称为“恒星年”（sidereal year），另一种则被称为“回归年”（tropical year）或“分至年”。回归年是太阳两次经过二分点所用的时间，具体时间为365日5小时48分46秒。因为四季由太阳在天球赤道南北位置决定，所以回归年成为了计时系统。在古代，天文学家发现回归年的长度是365.25天。在托勒密[2]时代，年的长度计算结果精确到比365.25天少几分钟。直到现在，许多国家仍旧使用格列高里历，制定出的年的长度与此相差无几。

恒星年指的是太阳两次经过同一恒星所用的时间，具体时间为365天6小时9分钟。基督教国家一直使用罗马儒略历到1582年，这种历法中的一年刚好是365.25天。这比回归年的长度多了11分14秒，因此四季会在千百年中慢慢发生变化。为了避免出现这种情况，人们需要制定一个平均长度尽可能准确的年的制度，罗马教皇格列高里十三世颁布法令，在儒略历的400年之间取消三次闰年。根据儒略历，每个世纪的最后一年肯定是闰年；而在格列高里历中，1600年仍然是闰年，而1500年、1700年、1800年和1900年则都是平年。

于是，格列高里历被所有天主教国家接受，也陆续在新教国家中普及，并成为世界通用的历法（辛亥革命后，中国也采用此历法）。

农历

在中国，除了格列高里历（俗称阳历）之外，还有盛行千百年之久的农历法。这是一种特殊的阴阳历，并不是单纯的阴历。中国的百姓到现在仍然以它为依据，安排农事、渔业生产以及确定传统节日。

农历是按朔望周期确定月份。月相朔（日月合朔）所在的日期为本月初一，下次朔的日期为下月初一。因为一个朔望月的周期是29.53天，所以分大月和小月，大月30天，小月29天。某月是“大”还是“小”，以及哪天是“朔日”，则根据太阳和月亮的真实位置来推算，古时称为“定朔”。

农历的年以回归年为依据。为了和回归年的长度相似，农历使用增加闰月的方法（根据二十四节气制定），并将岁首调整到“雨水”所在的月初。农历一年12个月，一共是354日或者355日，平均19年有7个闰月，这样就保证了19年的农历与19年的回归年的长度基本相等。所以通常情况下，中国人的19岁、38岁、57岁及76岁时的阳历生日和农历生日会重合在一起。

汉武帝太初元年（公元前104年）五月颁布的《太初历》，将含有雨水的月份定为正月，将这个月的初一定为岁首。因其更加科学地反映农业季节，除个别朝代有过短期改动外，一直沿用至今。

1　本书中的楷体文字为编译者添加或修订的内容。

2　托勒密（Ptolemy），公元2世纪的埃及天文学家。——编译者注

第二章 望远镜

折射望远镜

在了解了星辰系统及其运行规律后，相信使用望远镜会成为大家很感兴趣的事情。你们也一定非常想了解究竟什么是望远镜，用望远镜又能够看到什么。完整的望远镜结构是很复杂的，例如天文台上专用的望远镜。但是只需细心观察，你就可以大致掌握它的核心。了解这些核心之后，再去天文台使用这些仪器观察，你就会学到更多知识，获得比平常人更多的乐趣。

我们都知道，使远处的物体看上去很近是望远镜的重要用途，可以让一个几千米外的物体仿佛就在几米以内。产生这种神奇效果的天文工具由一些巨大的、打磨精细的透镜构成，这种透镜与我们的眼镜并无多大差异，只不过更大更精美。收集物体的光至少有两种方法：其一是让光通过许多透镜；再者就是用凹面镜将光反射出来。因此，望远镜也出现了不同种类，有折射望远镜、反射望远镜和折反射望远镜。我们先从常见的折射望远镜开始讲吧。

望远镜的透镜

折射望远镜的镜头由两种透镜组成：一种是物镜，它的作用是让远处的物体在望远镜的焦点上成像；另一种是目镜，在我们眼睛看得最清楚的地方形成新的像。

望远镜上最复杂和精密的部分就是物镜。制作物镜复杂且耗时，制作它的时间会比制作其他所有部分加起来的时间更长，因而要求更加细致精巧。有一个例子可以证明制作物镜需要的非凡天赋。一直以来，所有天文学家都相信，世界上只有一个人可以制造这种巨大而精确的物镜，他就是阿尔凡·克拉克（Alvan Clark），我们会在后面详细讲述这个人。

通常情况下，物镜由两个大的透镜组成。望远镜的性能完全依赖这些透镜的直径，被称为望远镜的“口径”（aperture）。望远镜的口径有大有小，小的如家用望远镜的口径大约是10厘米，大的如叶凯士天文台（Yerkes Observatory）的大型望远镜，口径达到1.02米。物镜的直径能决定望远镜的性能，放大了一定倍数的物体要保证被看清，在其自然亮度的基础上，所需要的光需要超过放大率的平方。例如，如果我们有100倍的放大率，就需要10000倍的光。

为了让远处的物体在望远镜中呈现出清晰的影像，物镜要将来自被观察物体上每一点的光都聚集到焦点上。假如做不到这一点，光会被分散到不同的焦点上，那么物体就会模糊不清，这与透过一副不合光的眼镜看东西一样。但无论使用什么玻璃制成的单片透镜，都无法将光集中到一个焦点上。我们都知道，平时看到的无论是来自太阳还是星星的光，都是由不同颜色混合而成的，我们可以用三棱镜将光分散开,从红色开始，依次是橙、黄、绿、蓝、靛和紫。单片透镜会将这些颜色不同的光聚集到不同的焦点上；红色的光距离物镜最远，紫色光则距物镜最近。这种将光分散开的现象被称为“色散”（dispersion）。

300年前的天文学家对这种透镜的色散问题束手无策。直到大约1750年，一个名为多龙德的伦敦人发现，利用两种不同的玻璃可以避免色散，这两种玻璃分别是冕牌玻璃和火石玻璃。这种方法的原理非常简单。冕牌玻璃的折光能力与火石玻璃的折光能力几乎一样，但冕牌玻璃的色散能力大出一倍。多龙德用两块透镜做了一副如图2–1所示的物镜，前面是冕牌玻璃制作的凸透镜，后面是火石玻璃制作的凹透镜。由于两片透镜的曲度相反，光会射向不同的方向。冕牌玻璃的凸镜使光聚集在一个焦点上，而火石玻璃的凹镜则令光分散。如果只单独使用一片透镜，例如火石玻璃，那它不只无法将光线聚集在一个点上，反而会使一个点上的光向各个方向分散开。多龙德的设计巧妙地让火石玻璃的聚焦能力只有冕牌玻璃的一半多一点。这一半的聚焦力足以消除冕牌玻璃引起的色散，但无法消除它一半的折射能力。这种组合使所有光线通过时，几乎全部集中于一个焦点，并且与单用冕牌玻璃相比，这个焦点远了大约一倍的距离。

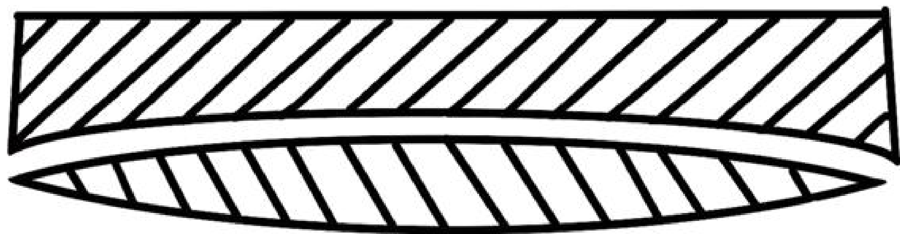


图2–1 望远镜中物镜的一部分

我之所以一直强调“几乎集中于一个焦点”，是因为两种玻璃的组合并不能将所有光线集中于同一个焦点。对于较明亮的光线，色散确实可以变弱，但并不能被完全消除。口径越大的望远镜，这一缺陷越明显。如果我们用一架大型折射望远镜观测月亮或星星，就会发现它们周围有一圈蓝色或紫色的光晕。这其实是由于两片透镜无法将蓝色光和紫色光集中到与其他颜色的光线相同的焦点上造成的。这种现象也被称为“二级光谱”的像差。这是由光学玻璃的性质导致的，科学家对此也没有更好的解决办法。只是目视使用的折射望远镜的视场较小，它的主要像差由二级光谱表示，缩小相对口径可以减少不利影响。

远处物体的成像

由于大型折射望远镜使用的是巨大且透光能力良好的光学玻璃，给制造者造成了很大的困难。大型折射望远镜在紫外波和红外波的透光性能上不如反射望远镜，存在残余色差。它在架构上的支持力也没有反射望远镜好，因此大型折射望远镜的制造成本居高不下。这些因素都制约了它向更大口径方向发展。世界上目前最大的折射望远镜的口径只有1.02米。

由于物镜聚光在焦点上的作用，远处的物体得以在焦平面上成像。焦平面是指通过焦点与望远镜的主轴或者与视线成直角的平面。

什么是望远镜成像呢？这个问题我们可以在照相机中的毛玻璃上找到答案。你会在毛玻璃上发现一副面孔或者远处的风景。照相机其实就

相当于一架小型望远镜，毛玻璃就是焦平面。或者，反过来说，望远镜就像一台大型的长焦照相机，我们用它来拍摄天空，就如同摄影师用照相机拍摄照片一样。

有时，我们理解了一件东西不是什么，常常能够更好地理解这件东西是什么。发生在距今100多年前[1]的那场著名的月亮大骗局就说明了这一点。一个作者用荒唐的故事欺骗了许多读者，故事是这样的：

约翰·赫歇尔爵士在使用放大倍率极高的望远镜看月亮时，发现光线不足导致看不清影像，因此有人建议他采用人工光来照亮那些影像。结果让人大为惊讶，他清楚地看到了月球上的动物。如果不是大多数人都被骗，我也就不用再说下面这句话：外来的光线从本质上是无法影响望远镜的成像的，因为它并非实像，而是远处物体的任何一点光线相交在影像相对应的点上，然后从该点散开，在焦平面上形成的一幅图画，这幅图画由光线聚焦而成，这样的像被我们称为“虚像”。

假设物体的影像（确切地说是图画）正好形成在我们眼前，大家也许会有这样的疑问：为什么看它需要用目镜呢？为什么观看者不能站在图画后面向物镜看去，直接看到影像悬在空中呢？观看者其实可以这样做：把一片毛玻璃放在焦平面上，之后就如摄影师使用照相机一样就可以了。如此一来，毛玻璃上就会呈现出影像，观看者可以不通过目镜，只望向物镜就能看到物体。但这样还是只能看到影像的一小部分，因此直接用物镜看并没有多大好处。假如想认真观测，目镜仍是最好的选择。目镜很小，与钟表匠用的小眼镜的本质一样，焦距越短，观察得越准确。

经常有人希望了解，著名望远镜的放大倍率究竟有多大？这个答案不仅由物镜决定，还取决于目镜。焦距越短的目镜，放大倍率越高。天文望远镜一般都配有多种不同的目镜，能够满足观测者的各种需要。

在不超出几何光学原理的范围内，我们使用任何望远镜——不论大小——都可以得到相应的放大倍率。使用普通显微镜观察影像，我们可以让一个口径10厘米的小望远镜与赫歇尔（Herschel）的大型反射望远镜拥有同等的放大倍率。但如果想让望远镜的倍率超过一定程度却存在很多困难。首先，物体表面的光很微弱。假设我们用8厘米口径的望远

镜来观测土星，让它放大数百万倍，土星的影像就会很模糊而难以看清。但这还不是让小型望远镜拥有高放大倍率的唯一困难。按照光学的一般定律，想将每2.5厘米口径的放大率提高到50倍以上是不可能的，最多不能超过100倍。简言之，一架2.5厘米口径的望远镜的放大率不能高于150倍，更别说300倍以上了。

除了这个问题，还有一个难题让天文学家们伤透脑筋，那就是地球大气造成的模糊，也就是我们常常说的看不清楚。

我们需要透过厚厚的大气层观察天体。如果让大气层的密度等同于我们周围空气的密度，那么大气层将会有10千米厚。但是，想观察10千米以外的东西，其轮廓又是模糊不清的。这是由于光线要穿过大气层，而大气是流动的，会造成不规律的折射，物体在这种影响下看起来会有起伏且颤抖。这种模糊的效果在望远镜中要强烈得多。视觉的模糊程度随放大率的增加而同比例增加。这种模糊程度可能取决于空气的状况。考虑到这个问题，为了能够更清晰地观察天体，天文学家试图为大型望远镜找到更稳定的空气。

我们常看到在一些计算方法中，大型望远镜由于具有高倍率，可以将月亮拉得离我们非常近。例如，我们用1000倍放大倍率的望远镜观察月亮，它似乎在400千米外的位置；而使用5000倍放大倍率的望远镜观察，它就只在80千米外的位置了。相对于视觉中月亮上东西的大小来说，这种计算方法是准确的，但这种计算方法忽略了望远镜的不足和大气流动的影响。这两种不利因素也会导致计算结果与实际情况不符。我难以相信，天文学家使用现有的望远镜观察月亮或者行星时，将放大倍率提高到千倍以上还能有很大作用，除非是在大气层出人意料地平静时。

望远镜的装置

在很多人的认知中，可能会觉得用望远镜观察天体是一件很容易的事，只要将望远镜架起来，再对着想要观察的天体就行了。我们不妨做个试验，将望远镜对准某颗星星，让人大吃一惊的事情发生了：这颗星星并没有静静地待在望远镜的视野中等着我们去观测，而是很快地逃开

了。之所以会出现这样的情况，是因为地球一直在绕着转轴自转，这种运动速度与望远镜放大倍率同比增加，所以星星看起来会向着相反的方向转动。如果使用高倍率的望远镜，那么结果就是我们还没来得及观察，星星就已经离开了我们的视野。

我们需要明白，因为望远镜中看见的视野会随着望远镜的放大作用而缩小，所以它的实际观测范围会比看起来的范围小得多，而缩小倍率与望远镜的放大倍率相同。举个例子，如果我们选用的是千倍望远镜，那么视野大约是2分的角度，从肉眼来看不过是一个小点。这与我们在一个6米高的屋顶上通过一个直径3.5厘米的小圆圈观察星星的情况类似。如果我们可以想象出通过这样的小圆圈观察星星的情形，也就会了解追寻一颗运动的星星是一件多么困难的事。

解决这个问题的方法是对望远镜增加适当的装置，让它在互成直角的两轴上旋转。所谓“装置”是指整套的仪器，有了它的帮助，我们就能够通过望远镜锁定一颗星星，并观察它的周日运动。

为了提升你的专注力，我们先简述一下这种装置的结构，了解一下转动望远镜的两轴之间的关系。装置主要的轴是“极轴”（polar axis），安装时需要与地球的自转轴平行，正对天极。我们知道，地球每天从西向东旋转，所以需要对望远镜设置一个与这根轴相连的装置，让它以同等速度从东向西旋转。这样，地球的旋转似乎就被望远镜的转动抵消了。当望远镜锁定某颗星星时，装置开始运动，这颗星星就会停留在望远镜的视野里了。

为了使望远镜能够指向天空中的任意一点，那么必须要有一根轴与极轴成直角，这根轴就是赤纬轴。它的上面有一鞘正好安在了极轴的前端，两者合成一个T形。望远镜可以在两根轴上转动，方便我们将它指向任何我们想观察的方向。

值得一提的是，中国汉代著名科学家张衡发明的浑天仪使用的就是与此相似的结构。浑天仪是球体模型，有一根从球心穿过的轴，轴与球有两个交点，分别代表南极和北极。球的外面套有两个圆圈，一个叫地平圈，另一个叫子午圈，两个圈交叉环套在一起。天球在地平圈的上下半露半隐，天轴支架则位于子午圈的上面。另外，球体上还有黄道和天

球赤道，两者呈24°的夹角。天球赤道和黄道上分别刻有二十四节气，以冬至为起点，划分为365.25°，每度分4格，太阳每天都会沿着黄道移动1°。

由于极轴平行于地轴，它与地平面的倾斜度正好等同于当地的纬度。在北纬南部，极轴偏于水平；而在北部，它又偏于垂直了。

很明显，上面讲到的望远镜装置还无法解决如何准确地找到一颗星星的问题。也许我们会花费几分钟甚至几小时，却仍然无法成功。但是这并不重要，我们还有很多寻找星星的方法：

每台天文望远镜的长筒下端都附有一架小型望远镜，它的名字是“寻星镜”（Finder）。寻星镜的放大倍率较低，但视野范围大。如果观察者能够看到那颗星星，便可以从镜筒外找到观察目标，再用寻星镜对准它，让它进入寻星镜的视野，接着将这颗星星移动到视野的中央。如此，这颗星星就在主望远镜的视野之中了。

但天文学家要观测的星星与平常人们的观测不同，大部分天体是肉眼看不到的，因此，他们必须想办法让肉眼看不到的星星出现在望远镜中。这就需要依靠分别安装在两轴上划分度数的圆圈了。一个圆圈上面刻着度数及分秒，表示望远镜所指的那一点的赤纬；另一个圆圈被装在极轴上，被称为时圈，时圈划分为24个小时，每个小时又划分为60分，用来表示赤经。当天文学家想寻找一颗位置确定的星星时，只需看一下恒星时钟，从恒星时钟中减去这颗星星的赤经，便可以得到它那时的时角，或者说，是它到子午圈的距离。转动望远镜，使圈上的度数正好等于这颗星星的赤纬度；然后转动极轴上的时圈，使其正好是这颗星星的时角；最后开动导星器自动追踪星星，想要找的星星就出现在望远镜中了。

如果你们认为上述操作过程复杂而烦琐，只需要亲自去天文台参观，马上就能明白这样做起来并不困难。与文字的讲解相比，实际操作会让看似深奥的学术问题更加简单明晰，也可以更快了解恒星时、时角、赤纬等专业名词。

望远镜的制造

我们再来讨论一下望远镜的制造吧，主要是它的制造历史。我们已经在前面提到过，物镜的制造是望远镜制造中最困难的，需要非凡的天赋。物镜最薄的地方只有0.0003毫米，如果制作过程中出现极其细微的差错，就会对成像造成不利影响。

物镜的制造简单说来是利用玻璃成形的技术，将镜片打磨成符合要求的形状，但这肯定不是望远镜制造的全部。制造物镜不仅需要技艺高超的磨镜师将镜片磨得精准，更需要制造具有足够均匀度和纯净度的大玻璃盘。如果玻璃在纯净度与形状上有任何问题，都会影响望远镜镜片的性能。

19世纪前，将火石玻璃加工出足够的均匀度是件非常困难的事情。因为玻璃中含有大量的铅，铅在熔化过程中会不可避免地下沉到底部，使玻璃底部的折射率大于上部。正因为如此，当时口径达到十几厘米的望远镜就被誉为精密的大型望远镜了。19世纪初，一个名叫吉南（Guinand）的瑞士人发明了一项制作巨大火石玻璃的工艺，这项他声称为秘密武器的技术，只是在玻璃熔化的过程中不停地用力搅拌而已，但他仍借此成功地将玻璃片做得越来越大。

做出来的玻璃片如果想应用到望远镜上，还需要手艺高超且具备相关光学技术的磨镜师将其打磨光滑。慕尼黑的弗劳恩霍费尔（Fraunhofer）就是这样一位磨镜大师。1820年左右，弗劳恩霍费尔制造出一架25厘米口径的望远镜；1840年，他又成功地制造出两架38厘米口径的望远镜，它们的性能都远远超过了之前所有的物镜，在当时的技术条件下被称为奇迹。这两个物镜分别被应用在俄罗斯的普尔科沃天文台和美国坎布里奇的哈佛天文台（Harvard Observatory）。哈佛天文台的这架望远镜直到半个多世纪后仍然还在使用。

弗劳恩霍费尔去世后，他的精湛技术是否得到传承我们不得而知，如果说他有后继者的话，我们在前面提到过的阿尔凡·克拉克当之无愧。克拉克是马萨诸塞州剑桥市的一个肖像画家，他几乎没有学习过相关的专业技术，更没有接受过使用光学仪器的培训，却取得了非凡的成就，这只能说明天赋在这件事上起着多么重要的作用。阿尔凡·克拉克似乎天生就拥有镜片制作的完整概念，在解决制造问题方面又具有超越凡人的

敏锐眼光。因此，在天赋的强烈驱使下，克拉克从欧洲购买了一些制作小型望远镜需要的毛玻璃片，并成功制作出一架10厘米口径的精致望远镜，这架望远镜的完美制作技术让克拉克在天文学界声名远播。之后，他又计划制造一架在当时前所未有的巨大的折射望远镜。1860年，一架46厘米口径的大型望远镜正式完工并成功问世，这是克拉克专门为密西西比大学制造的。这架望远镜刚完工尚待试验之前，克拉克的儿子乔治·克拉克曾使用它来观测天狼星（Sirius）的伴星（由于这颗伴星吸引着天狼星，人们早就知道它的存在，却从未见过它）。美国爆发内战之后，这架望远镜被芝加哥人买走，密西西比大学并没有得到它。这架望远镜曾经在埃文斯通的迪尔伯恩天文台（Dearborn Observatory）发挥了重要作用。

大型折射望远镜

19世纪末期，随着工艺水平的不断提高，各国制造光学玻璃的技术也得以改良，出现了大口径折射望远镜的制造风潮。当时，有许多专家显示出了他们高超的才能，精致而巨大的透镜不断被制造出来。

世界上现有的八架口径大于70厘米的折射望远镜，其中七架是在1885年到1897年期间建造而成的。其中，最有代表性的是1897年建造成功的102厘米口径的叶凯士望远镜，以及1886年制成的91厘米口径的利克望远镜。

越来越大的玻璃片陆续由英国制造出来，制造者是吉南的女婿费尔。阿尔凡·克拉克用费尔制造的这些玻璃片制成了更大的望远镜，包括为华盛顿的海军天文台（Naval Observatory）制造的66厘米口径的望远镜、为弗吉尼亚大学制造的大小相当的望远镜、为俄罗斯普尔科沃天文台制造的76厘米口径的望远镜形以及为加利福尼亚的利克天文台制造的91厘米口径的望远镜。

费尔去世之后，他的后继者是曼陀伊斯（Mantois）。曼陀伊斯制造的玻璃在纯净度和均匀度上都达到极致，是前人可望而不可即的。曼陀伊斯继续向阿尔凡·克拉克提供玻璃片，令其得以为威斯康星的叶凯士天文台号制造出最大望远镜的物镜，这架达到102厘米口径的望远镜至

今依然是世界上最大的折射望远镜。

此时的望远镜在机械方面已经取得了很大进步。到现代天文台参观的人不仅会惊讶于天象观测的便利条件，更会对观测的高明程度佩服不已。大型望远镜被安置得非常平稳，也很容易被推动，它的快速运动则由电机控制。如果想将望远镜移动到新的位置，天文学家只需按一下电钮就可以实现。同时天文台的圆顶也会转动，促使缝隙对准新方向，观测者脚下的木板也可以随意升降，以便观测者能够贴近目镜的新位置。

现代的光学望远镜充分利用了电脑的自动控制功能，这种自动控制显著改善了大型望远镜的操作性和观察性。

也有许多使用大型望远镜的研究会将目镜拆除，用其他工具替代，例如安装一件类似于装置底片的东西进行天象摄影，或者安装一座分光镜分析天体的光，又或者安装一种特殊装置记录天体的辐射强度。望远镜的重要功能是收集光，将许多光集中在一个焦点上，可以让人用前面讲到的或其他各种方法进行研究。还有一些望远镜是固定的，例如威尔逊山天文台（Mount Wilson Observatory）上的塔式望远镜。天体的光被活动的镜子折射到望远镜中，再由望远镜将光集中到焦点上，以利于实验室中的研究。

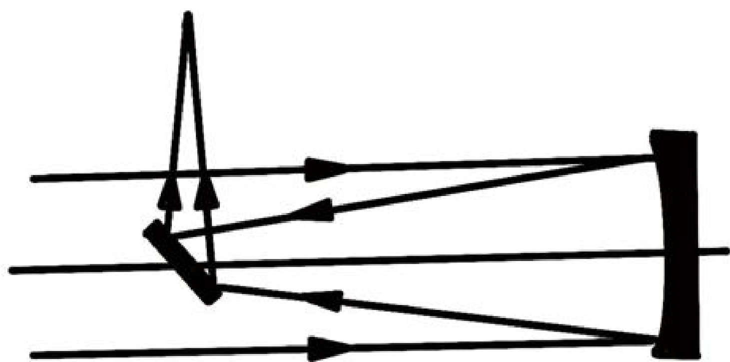
反射望远镜

通过前面一节内容，相信大家已经明白，物镜是一个透镜或许多透镜的组合，被安装在镜筒的最上面。它能将星光折射到镜筒下方的焦点上，在这个地方形成影像，我们可以用目镜来观察这个影像，可以摄影，也可以使用其他方法进行研究。伽利略使用的早期望远镜以及当时所用的望远镜都是折射望远镜，将这种望远镜通过消色方法改良之后依然具有最普遍的用途。

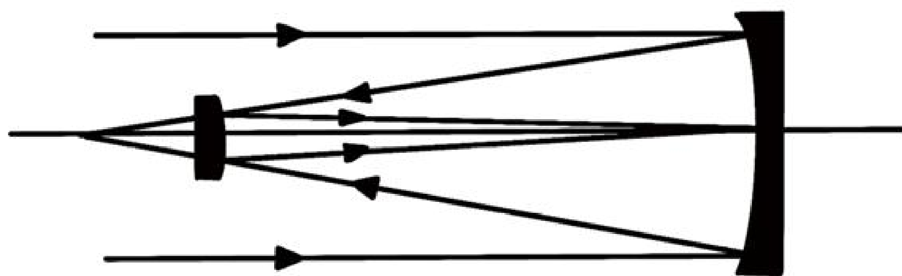
反射望远镜的结构与折射望远镜完全不同，它的物镜是一个凹镜，安装在镜筒的最下面，将星光反射到镜筒最上面的焦点上。反射望远镜在使用中会面临很多问题，其中一个也是最关键的问题是，光线会沿着

来路反射回去。如果想看清楚焦点上的成像，观察者必须从上面看镜子；如果观察者正对着镜子看，他就会从镜子里看到自己的倒影，他的头部和肩会挡住射向镜子的光线。所以需要想办法使光线向其他方向反射。由于使用的方法不同，出现了很多不同的反射望远镜系统。目前应用的有主焦点系统、牛顿系统、卡塞格林系统、格雷果里系统以及折轴系统等，我们主要介绍一下牛顿式（Newtonian）和卡塞格林式（Cassegrainian）。

牛顿式反射望远镜是最常用的望远镜，是将一个倾斜的反射镜放置在镜筒中接近筒顶的焦点之内。其反射面与望远镜的主轴成45°的夹角，从而可以将光线向侧面反射到镜筒边上的一个普通目镜上。从图2–2中我们可以看到，牛顿式反射望远镜的观察口在镜筒上端左边附近，观察者透过目镜望向的方向与他观察的星星成直角。大型反射望远镜的观测台连在旋转圆顶上，并且正对着缝隙，这样容易升降，使观察者可以在适合的位置观察望远镜指向的任何方向。



牛顿式



卡塞格林式

图2–2 牛顿式和卡塞格林式反射望远镜系统

卡塞格林式望远镜，主镜和焦点之间夹着一片曲度很小的反射镜片。主镜的中心开了个小口，小镜将汇聚的光柱反射到大镜上，然后通过主镜中心的小口，在镜后形成焦点，而目镜就放置在这个地方。使用这种望远镜的观测者朝他观测的物体看去，与他使用折射望远镜时相同。多数反射望远镜既可采用牛顿式，也可采用卡塞格林式。

反射望远镜的优点很多，例如没有色差、观测范围广、与折射望远镜相比更容易制造等。但它的不足之处也不少：口径越大视场越小，物镜需要定期镀膜等。现代许多大口径的望远镜大都是反射望远镜。

反射镜开始普遍应用是在300年前，尽管在更早的50年前，牛顿、卡塞格林等就已经对其中原理进行了解释。威廉·赫歇尔爵士等人也制造出了许多反射望远镜，其中一些望远镜被用来观测天象。爱尔兰的业余天文学家罗斯爵士在100多年前制造了一架直径为1.8米的大型反射望远镜，这架望远镜在当时被称为巨无霸，它之所以广为人知，是因为人们通过它第一次观测到了遥远天体的漩涡结构，这些天体后来被命名为旋涡星云。

早期的反射望远镜使用金属盘制作镜子，镜面变暗后需要再磨光。与现代的望远镜相比，赫歇尔、罗斯等人制造的大型望远镜明显粗糙得多。早期的反射望远镜无法准确地追逐天体向西运动，而这对于摄影来说非常重要，或者更准确地说，在现代天文学的观测中非常重要。

大约200年前，玻璃才取代了金属。将圆玻璃的一面打磨成需要的形状是很关键的，而且它的曲面还需要镀上一层很薄的银膜或铝膜。

对红外区和紫外区而言，这层膜有很好的反射率，适于在较宽的观测范围内研究天体的光谱和光度。如果镀膜变暗淡，更换起来也很方便。为了避免反射望远镜产生视差，视场往往比较小，所以经常会用增加像场改正透像的方法扩大视场。需要注意的是，在选择反射镜的材料时，材料的膨胀系数和应力要小，且容易磨制。

1918年底，海尔带领团队制造出的口径达254厘米的胡克望远镜正

式启用。天文学家使用这架望远镜首次观测到银河系的大小，以及我们在银河系的位置。天文学家哈勃（Hubble）还用这架望远镜研究天体，发表了宇宙膨胀理论。

到了20世纪30年代，技术的发展促使天文学家们对建造更大的反射望远镜充满信心。1948年，美国帕洛马山天文台制造出508厘米口径的望远镜，并以望远镜制造大师海尔的名字命名。这架望远镜历时20多年制造完成，尽管它的分辨能力超过胡克望远镜，但它并没有使我们对宇宙产生更好的认识。天文学家阿西摩夫就指出："海尔望远镜与50年前的叶凯士望远镜类似，似乎预示着一种特定类型望远镜的终结。"果然，阿西摩夫的结论很快得到了验证：1976年，苏联在高加索制造出一架口径达到600厘米的大型望远镜，但它也没有发挥重要作用。

折反射望远镜

折反射望远镜诞生于1814年，它由折射元件和反射元件构成，是在球面反射镜的基础上加入了用于校正像差的折射元件，既省去了困难的大型非球面加工步骤，又达到了成像质量要求。德国光学家施密特在1931年想出一种特别的方法，将一块接近平行板的非球面薄透镜作为改正镜，与球面反射镜结合，制造出能够消除球面和轴外像差的折反射望远镜，这种望远镜同样以制造者施密特的名字命名。施密特望远镜视场大、像差小，在拍摄暗弱星云时尤其能突显效果。

1940年，又诞生了其他形式的折反射望远镜，其中马克苏托夫将一个弯月形状的透镜作为改正透镜，制造出的折反射望远镜就很有代表性。这种望远镜的两个表面是两个曲率不同的球面，相差很小，但曲率和厚度都非常大。它的所有表面都是球面，与施密特望远镜相比，它的改正板更容易磨制，镜筒也比较短，但视场却不及施密特望远镜，而且对玻璃的要求更高。

折反射望远镜非常适合业余的天文观测和天文摄影，施密特望远镜和马克苏托夫望远镜就是现在主要的天文观测工具。

望远镜照相术

天文学的巨大进步之一就是摄影技术在天体研究上的应用。早在19世纪40年代，纽约著名的化学家德雷珀教授就成功地完成了一张月球的银版照相（daguerreotype）。随着照相技术的发展，哈佛天文台的邦德（Bond）和纽约的天文学家卢瑟福开始将其应用到拍摄星辰上。虽然不能与现代天体摄影技术媲美，但卢瑟福拍摄的昴星团及其他星团的照片至今仍然在天文学研究领域有着重要作用，可见他们已经成功了。

普通照相机其实也可以拍摄星辰，只需要将它安装得如同一架赤道仪一样，就可以用它在周日视运动中追寻星星了。几分钟的曝光就可以捕捉到比肉眼所见更多的星星，如果用大型照相机，甚至可能无须1分钟。不过，天文学家经常使用的是照相望远镜。普通照相机在经过改良后就可以满足天文拍摄的用途，不过为了获得拍摄的最佳效果，望远镜的物镜必须是特别制作的，能够将光线都聚集到一个焦点，这样才能使胶卷达到最佳的感光效果。为照相而设计出的折射望远镜通常比相同口径的目视望远镜更短，这样做是为了能同时看到更大范围的天空。同时，为了让大视野中的像更清晰并减少模糊的颜色，中间的物镜通常是两重，也就是所谓的“双分离物镜”。巴纳德就使用布鲁斯双分离物镜成功地拍摄了壮美的银河和彗星；而哈佛天文台61厘米口径的双分离物镜，也大大提高了我们对南天半球的了解程度。只要物镜能够充分消除色散，那么折射望远镜不仅可以用于目视，还可以用于摄影。

随着科技的飞速发展，未来的大部分天文工作似乎都可以借助照相技术完成，大量的摄影照片代替了我们在望远镜上的观测，这些可以长期保存的记录更利于精密的研究。常有这种情况发生，在一个新天体（如新行星或者新星） 被发现之后，天文学家可以在更早之前该部分天空的照片中找到这个天体的历史资料。冥王星就是在这种情况下被发现的。

古时候的天文学家用画图的方法努力记录太阳黑子、日食、行星、彗星、星云等天体现象。这些图画需要很长时间才能完成，其中还可能

含有记录者的个人偏见。所以，经常会出现两个天文学家绘制的同一天体图画完全不同，或者同一个天文学家在不同时间画出的同一天体不尽相同的情况。但通过照相，我们可以得到更加真实的天体影像，而且花费的时间更短。

天体摄影的最大优点是，经过长时间的曝光，底片上可能会出现许多用肉眼看不清楚或看不到的天体。例如，一些即使通过最好的望远镜也看不清楚的星云，在照片中却非常清晰。当然，如果想对一个非常微弱的天体进行拍摄，由于曝光时间长达几小时，除了准确移动照相望远镜的活动部分外，更需要天文学家高超的技术和非凡的耐性，这样才能拍摄出更好的天体照片。

延展阅读

大型光学望远镜

凯克望远镜（Keck Ⅰ，Keck Ⅱ）：位于太平洋夏威夷岛海拔4200多米的莫纳克亚山上，是世界上已投入工作的口径最大的望远镜之一。凯克望远镜以出资建造者凯克的名字命名，共有两台，分别是1991年建造的Keck Ⅰ和1996年建造的Keck Ⅱ，它们的配置相同，而且都被用于干涉观测中。凯克望远镜的整体镜面直径都是10米，由36块六角镜面拼接而成，每块镜面的直径均为1.8米，而厚度仅为10厘米，通过主动光学支撑系统，保持了镜面极高的精确度。主要由近红外照相仪、高分辨率CCD探测器以及高色散光谱仪三个部分构成。凯克望远镜的天文观测精度可达到毫微米程度，能够带领我们寻找宇宙的起源，让我们看到宇宙诞生的时刻。

欧洲南方天文台甚大望远镜（VLT）： 位于智利帕瑞纳天文台，由欧洲南方天文台于1986年开始建造，2012年全部建成并投入使用。这台望远镜由4台口径均为8米的望远镜组成，既可以单独使用，也可以组成一个光学干涉阵，进行高分辨率观测。4台望远镜排列在同一条直线上，全部使用地平装置，主镜面重22吨，但厚度仅有18厘米，采用主动光学支撑系统，指向精确度高达1秒，追踪精确度高达0.05秒，镜筒的重量为100吨，叉臂重量小于120吨。它主要为搜索太阳系邻近恒星的行星、研究星云内恒星的诞生、观察活跃星系核内可能隐藏的黑洞以及探

索宇宙边缘等提供服务。

大天区面积多目标光纤光谱望远镜（LAMOST）：安放在中国国家天文台兴隆观测站，是一架中星仪式的反射施密特望远镜，长50米、高30米，它的有效通光口径为4米，焦距为20米，视场高达20平方度（整个宇宙空间约有4万平方度），能同时观测4000个目标的光谱。它将主动光学技术应用于反射施密特系统中，在追踪天体运动的同时进行实时球差改正，并且具备了大口径和大视场的功能。LAMOST的球面主镜和反射镜均使用拼接技术，并且采用多目标光纤的光谱技术，光纤数目高达4000根，而普通望远镜仅仅含有600根。LAMOST将极限星等推高至20.5等，比SDSS计划（美国斯隆数字巡天计划）高出2等。2010年4月17日，LAMOST被正式命名为“郭守敬望远镜”。郭守敬是中国元代科学家，在天文、历法、水利和数学等方面都取得了卓越的成就，制订出了通行360多年的《授时历》，成为当时世界上最先进的一种历法。

射电望远镜

射电望远镜是探测天体射电辐射的基本设备。1932年，央斯基以无线电天线探测到银河系中心的人马座方向发射的射电辐射，代表着人类在传统光学波段之外研究天体的开端。1937年，美国人G·雷伯制造出第一架射电望远镜。1946年，英国曼彻斯特大学制造出直径66.5米的固定式抛物面射电望远镜；1955年，再次制造出可转动抛物面射电望远镜，并且还是当时世界上最大的射电望远镜。20世纪60年代，美国在波多黎各阿雷西博镇建造了直径305米的抛物面射电望远镜，这是全世界最大的单孔径射电望远镜，它顺着山坡被固定在地面上，所以无法转动。1962年，赖尔发明了综合孔径射电望远镜，并因此获得了1974年诺贝尔物理学奖。综合孔径望远镜可以让多个小天线结构获得一个大口径天线结构的功能。20世纪70年代，德国在波恩附近建造了直径100米的全向转动抛物面射电望远镜，它是全世界最大的可转动单天线射电望远镜。

射电望远镜可以测量天体射电的强度、频谱以及偏振等量，要求具有高空间分辨率和高灵敏度。天文学上的四大发现：类星体、脉冲星、星际分子和宇宙微波背景辐射，均与射电望远镜有关。射电望远镜的每

一次长足进步都让天文学的发展向前迈进一大步。

太空望远镜

红外望远镜：用于接收天体红外辐射的望远镜。红外观测始于18世纪末期，由于地球大气的吸收和散射，在地面上进行的红外观测只局限于几个近红外窗口，想获得更多红外波段信息就必须进行空间红外观测。红外天文学观测从19世纪下半叶正式开始，最初使用高空气球，后来逐渐发展到使用飞机运载红外望远镜或探测器进行观测。1983 年1月23日，美国、英国和荷兰联合发射了第一颗红外天文卫星IRAS，这颗卫星的主体部分是一架57厘米口径的望远镜，它的主要任务是巡视天空。IRAS的成功发射极大地推动了红外天文的发展，IRAS的观测到现在仍然是天文学的热点话题。1995年11月17日，欧洲、美国和日本合作的红外空间天文台IS0升空。ISO的主体部分是一架60厘米口径的R–C式望远镜，功能和性能都比IRAS完善。ISO优于IRAS的方面：波段范围大、空间分辨率高、灵敏度高（大约是IRAS的100倍）。

紫外望远镜：紫外波段是介于X射线和可见光之间的频率范围，观测波段为100至3100埃。在观测紫外波时，需要避免臭氧层和大气层对紫外线的吸收，所以只能在150千米以上的高空。从一开始利用气球将望远镜带到高空中观测，到后来使用火箭、航天飞机、卫星等空间技术，紫外观测有了很大的发展。1968年，美国成功发射0A0–2卫星，随后欧洲发射了TD–1A卫星，它们的主要任务都是观测天空中的紫外辐射。1972年，美国的OAO–3卫星发射升空，并被命名为“哥白尼”号，装载着一架0.8米口径的紫外望远镜，正常工作了9年，观测到950至3500埃的紫外光谱。1990年12月2日到11日，美国的“哥伦比亚”号航天飞机搭载天星一号天文台（Astro–1）进行了空间实验室第一次紫外光谱的观测；从1995年3月2日开始，天星二号天文台（Astro–2）完成了为期16天的紫外天文观测。1999年6月24日，FUSE卫星发射升空，这是美国国家航空航天局（NASA）“起源计划”中的一个项目，主要任务是要回答天文学上有关宇宙演化的基本问题。在全波段天文学中，紫外波段是非常重要的组成部分，自“哥白尼”号成功升空至今，已经陆续发展了紫外波段的EUV（极端紫外）、FUV （远紫外）、UV（紫外）等多种探测卫星，将全部紫外波段完全覆盖了。

X射线望远镜：X射线辐射的波段是0.01至10纳米，其中波长较短，也就是能量较高的被称为硬X射线，波长较长的被称为软X射线。天体中的X射线无法达到地面，在人造地球卫星升空后，天文学家才得到关于X射线的重要观测结果，X射线天文学也得以发展起来。1962年6月，美国麻省理工学院的研究小组首次接收到从天蝎座方向传来的X射线，令X射线天文学进入了快速发展轨道。之后，高能天文台1号和2号成功发射，X射线波动的巡天观测由此展开，X射线的观测研究也向前跨出了一大步，迎来了X射线的观测高潮。

γ射线望远镜：γ射线相较硬X射线，有能量更高、波长更短的特点。由于地球大气的吸收，对γ射线的天文观测只能通过高空气球和人造卫星搭载仪器进行。1991年，美国通过航天飞机将康普顿空间天文台（CGRO）送入地球轨道。它的主要任务是对γ射线波段进行首次巡天观测，同时也对能量较高的宇宙γ射线源进行灵敏度高、分辨率高的成像、能潜测量以及光变测量等，取得了许多有意义的科研成果。CGRO配备了4台仪器，它们在规模和性能上都比以往的探测设备有显著的提高，这些设备促进了高能天体物理学的发展，也标志着γ射线天文学进入成熟阶段。

哈勃太空望远镜（HST）：空间技术的进步，让在大气外进行光学观测成为可能，空间望远镜也由此诞生。空间观测设备与地面观测设备相比，具有显著的优势。首先，接收的波段范围更广，短波能够达到100纳米；其次，消除了大气抖动的不利因素，望远镜的分辨能力大大提高；另外，空间中没有重力，仪器不会由于自重出现变形。HST是美国国家航空航天局主持建造的4座巨型空间天文台之一，也是天文观测中规模最大、投资最多、最引人注目的一个项目。HST于1978年开始筹建，历时7年完成设计，并于1990年4月25日由航天飞机运载升空。但由于人为因素导致了主镜光学系统的球差，美国国家航空航天局不得不在1993年12月2日对其进行大规模修复。设计用来改正主镜球面像差的仪器被称为“空间望远镜光轴补偿校正光学”（COSTAR），包含两个在光路上的镜子，其中一个可以校正球面像差，光线被聚焦到暗天体照相机、暗天体光谱仪和高达德高解析摄谱仪。这次修复很成功，让HST的分辨率高出地面大型望远镜几十倍！2020年1月，一个国际天文学家团

队利用HST发现了迄今已知的最遥远、最古老的星系群，这个三重星系群被称为EGS77。更重要的是，观测表明这个三重星系群参与了早期宇宙被称为“再电离”的改造过程。EGS77大约诞生于宇宙大爆炸后6.8亿年，当时宇宙年龄还不足现今138亿岁的5%。

1 “月亮大骗局”发生于1835年。——编译者注

第三章 太阳、地球和月球

太阳系的概况

我们居住的行星所在的天体系统是太阳系。我们已经对包括地球在内的这群小型天体是如何自成体系有所了解了。对于宇宙而言，太阳系是渺小的，但对于人类却有着非常重要的意义，是我们的生存基础。在对太阳系的重要组成部分进行详细介绍之前，我们先简要了解一下太阳系是由什么构成和如何构成的。

首先要讲的一定是太阳。这个天体被命名为太阳，它的重要性可见一斑。太阳是位于太阳系中央的一个巨大球体，不停地向外辐射光和热，并且凭借自身强大的引力维持着整个太阳系的运行。

接下来是各种行星。它们在各自的轨道上环绕着太阳运行，我们赖以生存的地球就是其中的一颗。行星这个词的本意为“游移不定”，古人之所以这样命名，应该是因为行星会在恒星之间穿梭，而不是固定不动。行星可以分为截然不同的两类：大行星和小行星。

太阳系中有八颗大行星，是整个系统中仅次于太阳的最大天体，它们与太阳之间的距离由远至近有规律地排列。最近的是水星（距离太阳5800万千米），绕太阳一周只需要3个月；最远的是海王星（距离太阳约45亿千米），绕太阳一周要近165年。

八颗大行星若按质量大小和结构特征来分，又可以分为类地行星和类木行星。主要由石、铁等物质构成的类地行星，它们的特点是体积小、密度大、自转速度慢以及卫星少。水星、金星和火星都是类地行星。类木行星主要由氢、氦、氨、甲烷等物质构成，它们的特点刚好与类地行星相反，体积大、密度小、自转速度快，不仅卫星众多，还有由碎石、冰块或气尘组成的美丽光环。类木行星的成员包括木星、土星、天王星和海王星。

大行星被分为两个团体，距离太阳较近的四颗为一个团体，其余四颗为一个团体。两个团体之间有一道很宽的间隙，组成内层的四颗类地行星比外层的类木行星小，它们的体积总和还没有外层最小的行星体积的1/4大。在两个大行星团体之间运行的是无数小行星。与大行星相比，小行星非常小，几乎都集中在一条宽宽的带状区域，如果以太阳为参考，这条带状区域的范围从离地球不远的地方开始，一直到几乎10倍于地日距离为止。大部分小行星与太阳的距离都是地球与太阳距离的3至4倍。这些小行星与大行星最大的不同是数量特别多，还有更多新的小行星不断被发现，因此总数难以确定。

太阳系中的第三类天体是卫星，比如月亮。它们常常围绕着大行星运行，伴随大行星围绕太阳公转。就我们目前所知，除了最内层的水星和金星没有卫星外，其他行星都有数目确定的卫星。地球只有一颗卫星，就是月球；外层的土星已经被发现了82颗卫星；木星被发现的卫星有79颗[1]。因此，除了水星和金星之外，其余每颗大行星都位于一个类似于太阳系的系统的中央。好比太阳系以位于中心的太阳命名一样，这些系统也以中心天体的名字命名。如由火星及其卫星组成的火星系，由木星及其79颗卫星组成的木星系，由土星、土星环及其82颗卫星组成的土星系。

太阳系中的第四类天体是彗星。它们绕太阳运行的轨道是一个很扁的椭圆形状。我们只能在彗星接近太阳时才能看见它们，它们中的大部分需要我们等上几百年甚至几千年才会出现一次。即使彗星出现了，也需要很好的观测条件，情况稍有不利，我们依然难以一睹它们的真颜。

除了以上我们讲到的这些天体，还有许多微小的岩石块（我们称其为流星体）也沿着固定的轨道围绕太阳运行，它们都与小行星和彗星有一些联系。如果它们没有恰好进入地球周围的大气层中，形成“流星”，我们是无法看到它们的。

下面这个表格是以距离太阳远近的顺序排列的行星及其卫星数量：

类别	行星名称	卫星数	光环情况
内层大行星	水星（Mercury）	0	无
	金星（Venus）	0	无
	地球（Earth）	1	无
	火星（Mars）	2	无
	小行星	0	无
外层大行星	木星（Jupiter）	79	有
	土星（Saturn）	82	有
	天王星（Uranus）	27	有
	海王星（Neptune）	14	有

表3–1 行星及其卫星数量

在这本书中，我们不会按这个表格的顺序来为大家讲述各大行星。我们将在介绍完太阳之后，跳过水星和金星，先来认识地球和月亮，然后再叙述其他行星。

太阳

太阳位于太阳系中央，是星系中最大的天体，当然会首先引起大家的注意。我们知道，太阳是一个发光发热的巨大球体，但这个球体有多大、距离我们有多远？我们需要先了解一下。知道了太阳到地球的距离，那么太阳的大小就能算出来。这是最初级的几何知识：我们可以测量出太阳直径在我们视野中的视角，然后只要知道了太阳与我们的距离，就可以计算出太阳的直径。这是一道非常简单的三角问题。现在，我们精确测量出，太阳在我们视野中的角度是32分，那么太阳与我们的距离就是它直径的107.5倍，所以用太阳到地球的距离除以107.5得到的数值就是太阳的直径。

所有测量结果显示，太阳到地球的平均距离是14960万千米，除以

107.5得出太阳的直径大约是139万千米，大约是地球直径的110倍。这样，我们也就知道太阳的体积大约是地球体积的130万倍。

太阳的平均密度是地球平均密度的1/4，约为水的密度的1.4倍。太阳的质量约为地球质量的33.2万倍。太阳表面的重力约为地球表面重力的28倍。如果我们能站到太阳上去，那么我们会被自己的重量压倒。

太阳对我们之所以重要，是因为它可以提供光和热。假如失去来自太阳的光热，地球不仅会被无尽黑夜笼罩，而且很快就会陷入永久的严寒中。众所周知，地面会在夜晚将白天从太阳吸收而来的热量又散发到空中，所以夜晚气温会低于白天。如果失去白天的供给，热量就会一点点流失。想象一下，如果我们没有了太阳会是什么情况：失去光明是必然的，月亮和一些较明亮的行星也会变得暗淡，以至于我们基本无法看到它们。而满天都是平时很难见到的众多星星，只是由于它们的距离太过遥远，并不能带给我们光明和温暖。我们会开始觉得冷，像冬天的夜晚一样。而这只是开始，由于不再有黎明到来，气温会因此持续下降，最终将比南北极更加寒冷。同时，因为没有阳光，无法进行光合作用，植物将无法存活。这已经不重要了，因为不断下降的气温会将生物全部冻死。虽然水有储存热量的功能，海洋的温度下降得较慢，但是一段时间之后，所有的海洋都会冻冰。大气在持续下降的温度中液化，地球最后将变成银白色的死寂星球。

回到现实中，让我们来继续分析这个重要的天体吧！

我们将平常看到的太阳表面称为“光球”（photosphere），这个词可以很好地区别太阳的可见表面和庞大的内部。在我们眼中，光球的各部分均匀一致，但通过带滤光镜的望远镜就会看到，太阳的整个表面是斑驳的。在更好的条件下仔细观察，我们会发现光球表面布满了不规则的小颗粒。

当我们对光球各部分的光度进行对比时会发现，球面中心的亮度远远超过边缘部分。哪怕不用望远镜，也能看出这种区别。如果我们用一块黑玻璃挡住眼睛，或者在黄昏时分观察落日，就会发现太阳边缘的亮度不高，最边缘的亮度大约是中央亮度的一半。同时，边缘和中央也有颜色上的区别，边缘的光比中央的要暗红很多。

我们在观测太阳时，光球就是所能观测到的极限，无法看到太阳的内部结构。尽管光球看起来很光滑，像一个皮球，但它的密度非常低，只有空气密度的万分之一。我们看这一层时，视线也要穿过几万千米的太阳“大气”。由于这种大气非常厚，光球的圆面边上就会更黑更红。在太阳大气更高更冷的地方，那里的光更红，也更加微弱。

太阳的自转

经过更加细致的观察我们会发现，太阳与地球相似，也绕其中心的轴自西向东转动。与描述地球的情形一样，我们将转轴和表面相交的两点称为太阳的“极点”，将两极中间环绕太阳的一圈称为“赤道”。太阳赤道的自转周期是25.4天，太阳赤道的长度大约是地球赤道长度的110倍，因此它的自转速度是地球赤道自转速度的4倍多，大约为每秒2000米。

太阳自转的独特之处在于，离赤道越远的地方自转周期越长，而在太阳南北极附近，自转周期大约是36天。如果太阳和地球一样也是固体，那么太阳各部分的自转周期就应该是相同的。这样看来，太阳一定不是固体，至少表面一层不会是固体。

太阳赤道与地球赤道平面呈7°的夹角。太阳赤道的方向在我们看来，春季时，它的北极背离我们7°，而能够见到的圆面中心则在太阳赤道南部大约7°的位置；到了夏季和秋季，情况则恰好相反。

太阳的黑子和耀斑

我们在用望远镜观察太阳时，通常会在其表面看到一些近似黑色的斑点，我们将这些斑点称为“太阳黑子”（sunspot）。这些黑子随着太阳自转运动，也正是借助这些黑子，我们很容易测定太阳的自转周期——太阳视圆面中央出现一个太阳黑子，六天之后，这个黑点会移动到西部边缘，并在那里消失；大约两周后，这个黑子在东部边缘上重新出现。

太阳黑子大小不一，存在很大区别，有的微小到即便使用性能最好的望远镜也很难发现，而有的则大到用肉眼透过一块涂黑的玻璃就能看到。太阳黑子通常都是成群出现，我们有时可以用肉眼看到一小片黑子

群，而单粒黑子则难以看见。单个太阳黑子的直径有的可达8万千米，最大的黑子能遮住太阳表面的1/6。

随着数目的不断增加，黑子会按与太阳赤道平行的圈子展开。以太阳自转方向来讲，领头的黑子大多是群体中体积最大且寿命最长的，常常是其他的黑子都不见了，它依然存在。一群黑子中比较大的基本都是最后形成的，并且常常剩下一些单个成员。黑子中央更暗的部分被称为“本影”，边缘较亮的部分则被称为“半影”。在分散的过程中，黑子会分裂为一些不规则的碎片。

经过人类400年来对太阳黑子的观测[2]，我们发现太阳黑子的出现频率是有规律的，大约以11年为周期。在某些年份，太阳表面的黑子较少，大约有半年的时间看不到，1889年和1900年就是这样。接下来的一年，会有少量数目的黑子出现，此后5年内逐渐增加。之后，又开始一年年减少，直到这个周期结束，活跃度将再次增加。这种规律的变化早在伽利略时代就被人们发现了，直到1843年，施瓦布确立了黑子的周期率。

太阳和地球上的许多现象都遵循太阳黑子数目以11年为一循环周期的变化，深红的“日珥”（prominence）常常出现在黑子数量最多时；“日冕”（corona）则随着黑子数目的变化而改变形状；会扰乱无线电信号传输、破坏精密的电子设备等的地球上的“磁暴”（magnetic storm）也和黑子的强度大小以及出现频率一致；“极光”（aurora）也是在黑子数量最多时更频繁而壮观地出现。

太阳黑子的形成及其周期性显然与太阳的磁场有着密切关系。当前非常热门的太阳发电机理论，就试图通过研究太阳对流层中的流体运动与磁场的相互作用，解释太阳黑子的周期性和太阳磁场是如何维持的。1919年，拉莫尔提出了太阳发电机的概念；1955年，帕克提出了自激发电机理论，为湍流发电机理论奠定了物理基础。根据这种理论，在磁场很强的太阳活动区才会出现太阳黑子，内部的相互作用会产生周期性振荡，表面磁场也会随之出现微小变化。

太阳黑子的出现还有一个值得注意的规律：太阳表面并非全都有黑子，而是特定的太阳纬度上才有。太阳赤道上就很难见到黑子，在赤道

的南北方向上太阳黑子逐渐增多，以南北纬的15°到20°的数目最多，接着慢慢减少，纬度在30°以上就很少见了，如图3–1所示，阴影越重的地方黑子活跃度越高。如果我们用一个圆表示太阳，黑点表示太阳黑子，将观察到的黑子都画在相应的位置上，几年之后得到的就和图3–1一样。

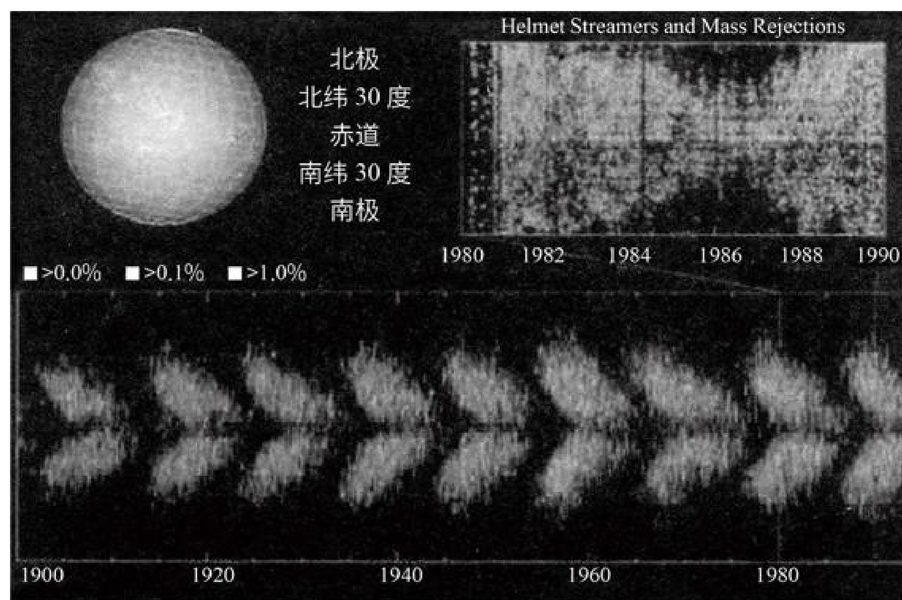


图3–1 太阳黑子周期变化

太阳表面除了黑子，还常常出现一些比光球更明亮的斑点，这些斑点往往出现在黑子附近，也就是所谓的“耀斑”（facula）。

黑子的出现表示太阳上有风暴发生，这和地球上的飓风类似，只是更加剧烈。炙热气体在太阳旋涡中快速上升，到达比内部压力小很多的光球之后，这些气体会喷发出来，并迅速冲出表面。这种膨胀的结果会使周围的温度稍微降低一点，这一区域的光亮因此削弱，太阳黑子也由此形成。事实上，菌状旋涡的平顶部分仍然很热很亮，因为与周围平静的太阳表面相比，温度更低，看起来就比较暗淡。

地球的自转使地球上包括飓风在内的所有旋涡在北半球是逆时针转动，在南半球则是顺时针转动。太阳黑子也一样，太阳赤道南部和北部的黑子在旋转的方向上正好相反，太阳的自转方向也就很容易分辨。但

是，太阳上的风暴比地球上的风暴复杂得多，因为领头的黑子和随从的黑子在旋转方向上常常相反，而更靠后生成的黑子的旋转方向受到已经存在的黑子群的影响，会变得更加复杂。

在100多年前，美国的海尔和法国的德朗德各自独立发明了太阳单色光照相仪（spectroheliograph）。这是连接在望远镜上的一部分，用它可以单独给某一特定的元素发出的光照相，当利用这种仪器给太阳进行氢光摄影时，会拍摄到“谱斑”（flocculus）相片，观察太阳黑子附近的形态分布，可以看到旋涡的存在。

为了消除大气层对太阳观测的不利影响，20世纪60年代以来，空间探测器以及各种探测太阳的人造卫星陆续被发射升空。这些携带了各类精密仪器的卫星对太阳进行了全方位、多角度的研究，其中包括黑子周期现象，并且取得了很大成果。有了它们的帮助，我们可以更准确地预报太阳黑子和耀斑的爆发，从而避免磁暴对电子设备的损害。

日珥与色球

日珥是太阳的另一个明显特征。人类在研究太阳这个神秘而美丽的部分时，有过一段很有趣的历史，我们将在后面讲述日食时再详细告诉大家。日珥是从太阳各部分射出来的非常稀薄灼热的大团气体。它们非常大，地球投入其中就好比一粒沙子投进了蜡烛的烈焰中。这团气体升起时的速度相当可观，有时高达每秒数百千米。与耀斑一样，日珥会在太阳黑子密布的地区出没，但又不仅仅局限于这些地区。地球大气层的光反射形成了环绕太阳的炫目光芒，这样的光芒让我们完全无法用肉眼看到日珥，哪怕用正规的天文望远镜也不行，除非出现日全食——月球遮挡住了太阳的光芒才能看到。那时，日珥好像是从黑暗的月亮边上升腾起来的火焰，肉眼即可观测。

日珥有两种表现形式——爆发日珥和宁静日珥。爆发日珥就像从太阳上升起的巨大而翻滚的火浪；宁静日珥却似乎悬在太阳上面静止不动，像空气中飘浮的云朵一样。我们还不明确是什么东西支持着日珥，但极大可能是太阳光的排斥力。

光谱分析的结果表明，日珥由氢、钙以及少量其他元素构成。由于

含有大量氢元素，日珥呈现出红色。对日珥更进一步的研究发现，日珥与包裹在光球上面的气体薄层有关。这个薄层被称为“色球”（chromosphere），因为它有和日珥一样的深红色，因此推断色球的构成与日珥一样，主要成分也是氢。

最后一个值得我们注意的太阳最外层的附属品是“日冕”。日冕是只有在日全食时才看得到的环绕太阳的柔和光辉，是太阳放射出的长长光线，其长度有时可以超过太阳直径。它由极端稀薄的气体组成。我们也会在后面讲日食时详细介绍它。

太阳的构成

现在让我们回顾一下我们所了解和看到的太阳是如何构成的。

首先，这个球体有一个我们永远看不到的巨大内部。

我们看向太阳时，肉眼所见的太阳表面是光球，但光球并不是真正的太阳表面，只是球体光度最大的部分，或者说更像一个几百千米厚的气体层。这个气体层上有斑驳的黑子以及从其内部或上面产生的耀斑。

光球顶上的气体层被称为色球，可以用高倍望远镜在任何时候观测到，但想直接用眼睛看却只能在日全食的时候才行。

火红色的色球喷发出的同样红的火焰被称为日珥。

围绕在整个球体外面的是日冕。

上面这些内容就是我们所看到的太阳。那它究竟是什么呢? 首先，它的形态是固体、液体还是气体呢？

太阳的自转性质表明，其看得见的表面并不是固体，而它极高的温度也证明它既不是固体也不是液体。一直以来，大家都认为太阳内部是一大团气体，这种气体是具有很多奇妙性质的物质状态，被太阳上巨大的引力压缩成液体的密度。根据物理理论，我们认为理想气体的状态方程仍然适用于太阳内部，所以我们也可以将其看作是气体。

没有人否认太阳一定是极热的这个结论。虽然我们距离它有1.4亿多千米，但在炎炎夏日仍然可以感受到它的强大威力，因此太阳本身当然更是热极了。通过适当的测算也可以验证，作为太阳辐射直接来源的光球，其温度高达6000℃以上。

尽管用了不同的方法测量太阳的表面温度，但得到的结果都是相同的。这些方法遵循了相同的原则：辐射体温度与辐射功率之间有密切关系。例如，辐射与温度的四次方有比例关系——这就是斯特藩–玻尔兹曼定律（Stefan-Boltzmann law）。斯特藩–玻尔兹曼定律让我们认识到，如果辐射体的温度升高1倍，它辐射出的热量就要增大16倍。

假设将1厘米水深的冷水放在平底盆中，接受太阳光的直射。1分钟后，如果不受空气的影响又没有热量损失的话，水的温度将会升高大约2℃。

故此，如果一个由一层1厘米厚的冷水组成的球形壳层，半径等于地球和太阳之间的距离，将太阳正好围在正中，那么1分钟后冷水的温度就会升高。因为太阳已经被这一壳层完全包住，所以我们会在1分钟之内接收太阳的全部辐射。

按这样的测算方式，可以得出从太阳表面不断流出的能量达到了每平方米6.2万千瓦。根据辐射定律，又可以推算出太阳的温度。这次我们可以不再用水盆或普通温度计，已经有一种很精巧的仪器可以帮助我们得到数据，这就是太阳热量计（pyrheliometer）。将太阳热量计应用到观测中，已在史密森天体物理天文台（Smithsonian Astrophysical Observatory）的各分部进行了许多年。

我们无法看到光球以下的太阳内部，因此想对太阳内部情况有一个明确的概念是非常困难的。但越深处的压力与温度越高，由此我们可以进行假设。1870年，美国物理学家莱恩（Lane）就进行过太阳内部温度的计算，他假设太阳内部的各处都处于一种平衡的状态，下面热气体的膨胀力支持着每一点上物质的全部重量。关键是计算出内部温度要高到什么程度才不会让太阳被自己的重量压碎。

20世纪30年代，英国的爱丁顿（Eddington）、詹姆斯（Jeans）以

及米尔恩（Milne）等人将研究太阳及星辰内部的理论作为重点。爱丁顿计算出太阳中心的密度约为水的50倍，而温度约为3000万℃至4000万℃；米尔恩推算出的太阳中心密度与温度比爱丁顿得出的数值大得多。按照目前的太阳模型推算，太阳内核的气体被极度压缩，其中心密度是水的150倍，而温度约为1560万℃！

太阳热能的来源

正如我们上面讲到的，太阳表面不断流出的能量达到每平方米6.2万千瓦，已知太阳的直径是140万千米，我们很容易算出它的表面积为多少，这巨大的数目再乘以6.2万，得出的就是以千瓦为单位的太阳不停释放出的全部能量。但是，当面对地质学家和生物学家提出的“太阳以同样的强度已照耀地球5000万年”的理论时，我们会遇上一个关键而困难的问题。

太阳的热能来源于哪里？如何维持？当然如我们前面所讲，光球会产生直接的热源，可是一定还得有新的能量供给不断地到达光球，才能有持续不断的辐射。那么，这种使太阳照耀了5000万年的、仿佛永不枯竭的内在供给的来源到底是什么呢?

根据能量守恒定律，能量可以由一种形态变为另一种形态，但不可能无中生有，宇宙间能量的总量也不能增加。除非太阳有从外部不断接收能量的途径，否则它的能量储藏量一定会减少。这样的话，能量储藏量总有一天会完全耗尽，太阳会渐渐暗淡下去，最终完全无光。但是太阳一百年又一百年地照耀着，其光辉看起来丝毫未减，这是怎么回事呢?

200多年前，物理学家亥姆霍兹（H.　Helmholtz）提出了太阳热的收缩学说，这种学说在之后的很长一段时间内都被当时的科学家广泛认同。亥姆霍兹的观点是：如果太阳半径每年收缩43米，就足够产生一年中由辐射失去的热量。按照这个观点，太阳从前更巨大、更稀薄，太阳将来会紧密到无法收缩以适应由辐射带来的热的损失。几百万年以后，它将会冷得不能再为地球上的生命提供光和热。

收缩学说为世界勾勒出一幅暗淡的远景，因为它显示了生物世界的

末日或许就在很短的时期之后——至少以天文学尺度来说是很短的。但到了19世纪初，收缩学说遭到了学术界的强烈质疑——不论从多大的体积收缩到现在，太阳按现在这样的发光率，只需2000万年多一点就完全得到充分的热量了。但按照这样的比例，太阳照射的时间一定比这个时期要长得多。这样一来，收缩学说就无法解释太阳在过去是如何持续辐射的了，我们自然也无法相信它对将来的预言。事实上，并没有明确的证据证明太阳在逐渐收缩，因此这一理论渐渐被人们抛弃。

20世纪初，相对论以及核物理学的发展让人们逐渐认识到，核能的释放为太阳和恒星提供了能源。光谱观测的结果表明，恒星物质内部含有相当丰富的氢，而氢是很好的产能原料。高温和高压的共同作用使氢聚变成氦的同时，释放巨大的核能，因此可以维持太阳和恒星向外辐射达数十亿年之久。

1926年，英国剑桥大学著名的天文学教授亚瑟·爱丁顿（Arthur Eddington）出版了一部关于恒星内部情况及其物理特性的卓越著作——《恒星内部结构》（*Internal Constitution of the Stars*）。爱丁顿在书中提出，太阳通过重力将物质聚集在一起，并将它们拉向中心。由于太阳内部高温气体产生的压力与重力方向相反，会将物体向外推出，两个力互相平衡。当达到这个平衡点时，根据经典力学和热力学原理，我们可以算出恒星的中心温度达到4000万摄氏度左右。在这样的温度下，氢核会发生聚变，为太阳和恒星提供强大的辐射能量。

爱丁顿的学说同样遭到了物理学家们的竭力反对。他们认为4000万摄氏度太低了，不足以克服原子核之间极其强大的电磁力。想真正实现这一聚变，温度应达到几百亿摄氏度。但是，美籍俄裔核物理学家和宇宙学家乔治·伽莫夫（George Gamow）通过实验证明这些物理学家们的猜测并不正确。伽莫夫认为，尽管镭核内的粒子受到核力的约束，但按照现代量子理论，它们存在分裂出α粒子的可能，哪怕发生这种过程的概率很小。核力束缚了镭核中的粒子，就好像有一座堡垒从外边将它们包围住一样，粒子的能量无法越过这座堡垒跑到外边去。量子力学却认为，核内粒子的通过途径并非只有堡垒的上面，而是借由穿过堡垒的一条隧道达成，人们将这种现象形象地称作“量子隧穿”。伽莫夫进一步指出，粒子如果能够由内向外穿过堡垒，那么它也应该能够由外向内穿过

堡垒进入原子核内。

1929年，英国天文学家罗伯特·阿特金森（Robert　Atkinson）和德国核物理学家弗里茨·豪特曼斯（Fritz　Houtermans）合作，将伽莫夫的量子隧穿理论应用到恒星内部能量的问题上，发表了一篇题为《关于恒星内部元素结构的可能性问题》的文章。他们在文章中提出：恒星内部的质子也可以通过"隧道"越过势垒[3]很高的堡垒，接近到可以发生聚变的距离之内，进行轻氢核聚变而释放出巨大的能量。这样，就成功地解决了在较低温度下使氢聚变为氦来满足太阳的能量需求。由于这种反应是在数千万摄氏度下进行的，因此他们把这种反应称为"热核反应"。

天文观测表明，太阳核心的物质处于等离子态，与热核反应的物理条件完全相符。那么，太阳和恒星内部的氢又是如何聚变为氦的呢?1938年，美国核物理学家汉斯·贝特（Hans　Bethe）和查尔斯·克里奇菲尔德（Charles　Critchfield）发现了氢直接变为氦的反应机制，称为"质子–质子循环"。在这一反应中，每克氢会释放出6700亿焦耳的核能，这些核能又迅速转化为热能，并通过对流和辐射向太阳的外层空间输送出去。之后，汉斯·贝特及德国的弗里德里希·冯·魏茨泽克（Friedrich　Von　Weizsacker）又各自独立地找到了由氢转变为氦的"碳循环"机制。现代天文观测表明，"质子–质子循环"为太阳提供了98%的能量，其余2%则来源于碳循环。汉斯·贝特因为创立"质子–质子循环"理论获得了1967年度诺贝尔物理学奖。

太阳的演化

现代观测表明，太阳的历史已有50亿年。它是一颗具有代表性的中等质量恒星，正稳定地燃烧着自身的核储备，并把氢转变为氦。人们对恒星演化的知识已经在逐渐完善，并勾勒出太阳的生命历程。

幼年时期，原始星云受自身引力持续收缩，密度不停增大，温度也随之升高，历时数千万年形成原始太阳。

青年时期，太阳位于非常稳定的主星序（具体内容参见本书第六章"恒星"），按照得到的氢和氦的丰度来计算，太阳还可以生存50亿年之久。今天的太阳正处在它生命最旺盛的时期。

中年时期，约持续10亿年时间。当热核反应的燃烧圈接近太阳半径的1/2时，太阳自身的巨大引力会令其难以支撑，中心将出现坍缩，坍缩过程中释放的巨大能量使太阳的外部大幅膨胀。这个时候的太阳体积很大，密度却很小，表面亮度很高，会演化为一颗红巨星，直径将扩大到现在的250倍，地球将被其吞没。

老年时期，太阳转变为一颗脉动变星，内部核能终于耗尽，整体坍缩，内部被压缩成一个密度很高的核心，冷却后形成一颗白矮星，并长久地留在宇宙中。

地球

地球是行星之一，尽管它没有太多独特的地方，但因为是我们居住的家园，所以很有必要讨论一下它在天体中的位置。

尽管与宇宙间太阳系这样的大天体，甚至太阳系中的大行星相比，地球都是微不足道的一员，但在它所属的系统中，地球仍是不可否认的最大的一个天体。

让我们用一个广泛的定义来描述地球：它是一个物质球体，直径大约是1万多千米，各部分的引力作用将其连接为一体。我们知道，地球并不是一个严格意义上的圆球，地球赤道部分稍稍鼓起来一些，再加之地球表面并非平整，所以要确定它的大小和形状并不容易。人造卫星技术的发展，让这一难题得以解决。

我们可以用两组数据来表示地球的形状及其大小：极直径12713.6千米，赤道直径12756.3千米。由此可以看出，地球极直径要比地球赤道直径小42.7千米。

地球的内部

我们的直接观察所得仅限于地球表面，人类在地球表面挖掘的最深处与地球大小相比，犹如苹果皮之于整个苹果。

首先，我想请读者们对地球的质量、压力、重力等概念有一个认知。我们试着对一块1立方米的泥土进行研究，假设它是地球表面的组成部分。这块泥土底部需要承受的质量大约是2.5吨，下面1立方米泥土的质量与它相同，所以下面这块泥土底部承受的质量加起来是两个2.5吨。随着不断地深入，压力会一直增加。对地球内部而言，每平方米都要承受从表面到底部的1平方米柱形的全部压力。在地球表面下几厘米的地方，这种压力就要以吨计，那么1千米深处的压力大约是2500吨，100千米深处的压力大约是25万吨，直到地球中心。由于承受着不可思议的巨大压力，所以地球中部的物质处于高度压缩状态，也更沉重。地球的平均密度大约是水密度的5.52倍，而地球表面的密度仅仅是水密度的两三倍而已。

地球表面下的矿坑是地球可以确定的事实之一，随着矿坑深度的增加，温度也在不断升高。由于受到地域和纬度的限制，温度升高的比率也会有所不同，平均升高率是深度每增加约30米，温度就上升1℃。

根据这种情况，到了地球中心会是什么样呢？关于这个问题的答案，我们不能仅以表面情形进行推测。地球外部在很久以前就已经冷却了，所以在地表以下温度不会上升太多。地球存在以来的所有热量都被保持着这一事实证明，地球中心的温度一定是最高的，而近表面的温度升高比率也一定会保持到几千米的深处，甚至直到地球的内部。

根据升高率推测，地球20多千米深的地方是炙热物质，而200多千米或更深的地方，其热度一定足以熔化组成地壳的物质。早期地质学家依据这个事实推测，地球是一个熔化了的巨大物质，就像熔化之后的铁块一样，最外面是一层若干千米的冷壳层，我们就生活在这个厚厚的壳上。火山的存在和地震的爆发都证明了上述推测的可靠性。

不过，19世纪20年代，天文学家和物理学家收集到的证据显示，地球从内到外都是由固体物质构成的，甚至比同体积的钢铁还硬。开尔文爵士[4]首先提出了这个学说。他认为，如果地球是被一层壳包裹着的液体，那么月球的作用就不是引发海洋潮汐，而是将地球拉向月球的方向，但外壳和内部液体的相对位置不会发生变化。

地球表面的纬度变迁也是一种可以佐证的奇特现象，我们将在下文

中详细介绍。无论是内部柔软的球体，还是硬度比钢铁小的球体，都无法像地球一样旋转。

这样一来，我们该如何解释固体物质和难以想象的高温呢？或许我们可以这样理解，因为受到巨大的压力，地球内部的物质保持了其固体的形态。实验表明：强大的压力能够提高物质熔点，压力越大熔点越高。当一块岩石达到熔点，如果对它施以重压，它便会还原为固体形态。因此，只要温度和压力同时增加，地球中心的物质就可能是固体。

当然，我们还可以用一些实际办法获取证据，在地球表面放置一个人工震源（如炸药），通过接收地下的回波来确定地球内部的组成。根据地震技术获得的资料可知，地球内核和地壳是固体物质，而中间外核和地幔层是液体物质。地核的主要组成成分是铁，剩余的是一些比较轻的物质。地核中心的温度大约是7200℃，这比太阳表面的温度还要高；地幔层的上部由硅、镁、氧、铁、钙、铝等物质构成；地幔层的下部由橄榄石、辉石、钙、铝等物质构成；地壳主要由石英、类长石的硅酸盐构成。

地球的重力和密度

地球的密度同样是一个有趣的问题，我们也可以把它称为比重[5]。我们知道，同体积的铅比铁重，而同体积的铁比木头重。那么，我们是否能够确定地球内部1立方米的重量呢？如果这个问题可以得到解决，我们就能算出地球的全部质量。这个问题的解决方法与物质的引力有关。

当小孩会走路时，万有引力的效应就在发挥作用了，但即使是最聪明的哲学家也无法弄清楚万有引力是如何来的。根据牛顿的万有引力学说，并不是地球中心将表面的物体吸引向自己，而是构成地球的所有物质共同努力的结果。牛顿将万有引力学说进一步引申，认为宇宙间的所有物质都会吸引其他物质，而引力大小则根据两者之间距离的增加，按照平方规律依次减小。这意味着，如果距离加倍，引力就要被4除；距离是3倍，引力就要被9除；距离是4倍，引力就要被16除，以此类推。

对上述问题有了了解，我们就知道周围的物体都有自己的引力。但是，又出现了新问题，我们能否通过实验测量引力的大小呢？数学理论

表明，相同重量的球体吸引表面小物体的力量会随着直径的增大而增加。如果一个直径60厘米的球体，它的密度与地球密度相同，那么这个球体的引力是地球重力的两千万分之一。

利用这个结论，英国物理学家亨利·卡文迪许（Henry Cavendish）通过一个巧妙的方法测量出了万有引力的大小。他在一根轻质金属杆的两端装上等重的铅球，悬挂在一根很细的石英丝上，接着把第三颗铅球放在其中一颗铅球的旁边，借助石英丝的扭曲程度测量出两颗铅球之间的引力。这项测量工作的精细程度和难度前所未有，虽然使用的设备的原理非常简单，但达到的精度却是之前难以想象的。为了说明这项测量的困难程度，我们必须想到这个引力可能还不如这两颗铅球的千万分之一大。想要寻找出重量不超过这个引力大小的东西是件相当困难的事，不必说一只蚊子的重量，就算是蚊子的一条腿可能都超过要测量的这个力了。把蚊子放到显微镜下，专业人员从蚊子的触须上切下一小片，这一小片的重量大约与两颗铅球间产生的引力相等。

在美国度量衡标准局中由赫尔（Heyl）测量出的万有引力常数是最精确的测量数值，这个测量结果让我们知道，地球的平均密度比水的密度大5.5倍左右，虽然比铁的密度稍小，但比任何普通的石头都大得多。由于地壳的平均密度只是地球平均密度的一半，所以可以推断，地心的密度被压缩到远大于铁的密度，而且极有可能超过了铅的密度。目前主流理论认为，构成地核的致密物质可能是大量致密的铁，我们可以认为地球中心是一块巨大的铁。

纬度的变迁

我们都知道，地球绕着地轴自转，这根自转轴通过地球中心与地球表面在南北两极相交。发挥一下我们的想象力，想象自己站在地球两极中间，然后将一根木棍固定在地上，我们会在地球自转的作用下每24小时绕着木棍旋转一周。我们之所以能够感知到这种运动，是因为周日运动带动太阳星辰反方向水平运动。现在我们有了一个重大发现：纬度处于变迁之中。地球的自转轴与地球表面的交点并不固定，而是沿着一个直径将近18米的圆圈进行不规则的曲线运动。换言之，如果我们能够确定北极的极点，那么将会发现极点每天或多或少地在移动，10厘米、20

厘米或者30厘米，经过一段时间后，围绕着某个圆心走出一条曲线，在这一过程中，极点有时距离圆心近一些，有时又距离圆心远一些，这个不规则的路线运动周期是14个月。

我们也许会感到诧异，相比地球这样的巨大物体，这个小小的变动是怎么被发现的呢？其实不难回答，是通过天文观测，我们可以在任意一天的夜晚测量当地的垂直线和当日地球自转轴的精确角度。为了进行这项观测，国际大地测量协会（International Association of Geodesy，IAG）于1900年环绕地球建造了四个观测站，分别建造在马里兰州盖瑟斯堡附近、太平洋沿岸、日本以及意大利。在这些观测站建立之前，欧美的很多地方已经开始进行类似观测。

我们刚刚所讲的纬度变迁现象，最初由德国的库斯特奈尔发现，并于1888年提出，他通过大量的天文观测意外发现了这一现象。此后，旨在测定精确曲线轨迹的科学研究一直在继续。截至目前的观测显示，纬度的这种变迁在某些年份会大一些，某些年份又会少一些，七年中的一年，北极点会走过一个比较大的圈子，而三四年之后又有好几个月几乎不离开圆心。

在天文观测资料中，我们一样能够发现地球自转时快时慢的不规则变化，这种变化快到大约只有1毫秒。另外，地球自转的不规则变化还包括周期接近十年甚至几十年的“十年尺度”变化，以及周期为两年到七年不等的“年际变化”，十年尺度变化的幅度大约是3毫秒，导致这种变化的原因现在还不清楚，可能是地壳和地幔之间的相互作用造成的。年际变化的幅度是0.2到0.3毫秒，大约是十年尺度变化的1/10。全球性大气环流可能是年际变化的主要原因，类似于在厄尔尼诺期间赤道东太平洋海水温度的变化情况。但这种一致性由何种原因导致，我们现在并不清楚。

大气

无论是从天文学的角度看，还是从物理学的意义上讲，大气都是地球上非常重要的要素之一。尽管它是我们生存的必需品，但也是天文学家观测研究中必须要逾越的最大屏障，因为它给精密观测带来了很多困

扰。大气会对穿越其间的所有光线或多或少地进行吸收，导致天体的真实颜色发生改变，即使是在最晴朗的天空，观测到的景象也会因此暗淡。大气还会对经过的光产生折射，使光线的轨迹发生弯曲（对于地球来说，这条轨迹是凹的），而不是直接射进天文学家的眼睛，这样就会使星辰看起来离地平线比实际位置高一些。从天顶直接照射下来的星光不会发生折射，距离天顶越远的星星，折光越严重。与天顶成45度角时，折光大约是1弧分，虽然这种曲折程度对于肉眼没有区别，但对天文学家的观测研究会产生非常大的误差。天体与地平线的距离越近，折光率就越大，天体与地平线的折光率是28度角，是地平线上45度角折光率的两倍左右。折光导致的天体误差已经大于半度了，肉眼看见的太阳直径都会比它小。这种情况导致的结果是，当日出日落时，我们见到的太阳实际上在地平线之下，而不是在地平线之上。我们能够看见太阳，完全是太阳光发生折光的结果。地平线附近折光率更大的另一个有趣现象是，在地平线附近的太阳看起来更加扁平，太阳的垂直直径似乎比水平直径更短，这是由于太阳下半部的折光率更大。如果是在海上观看日出或日落，这种现象会更加明显。

当太阳在热带地区慢慢地落进大海中时，会出现一种在温带地区很难见到的景象。由于各色光线在大气中的折射率不同，大气如同一块三棱镜，能够折射各个角度的光线，红色光线的折射角度最小，其他依次是橙、黄、绿、蓝、靛、紫，折射率逐渐增大，等到太阳在海平面上消失时，最后一束光线按照同样的顺序相继消失。在太阳即将隐没前的几秒钟，残留的边缘会变换颜色，并迅速变得暗淡。太阳的浅色余晖变成绿色，最后看见的则是一道转瞬即逝的蓝色或紫色的闪光。这是由于蓝光和紫光的波长短、折射率大，所以我们的眼睛还来不及捕捉，它们就已经被大气散射、吸收掉了。

月球

经过各种方法测量出的结果表明，月球和地球之间的平均距离大约是38.6万千米。这个数字是通过直接测量视差（后面会对这一点进行详细讲述）得出的，也可以通过计算月球围绕地球的运动轨迹求出。月球

的轨道是椭圆形的，因此实际距离常常发生变化，有时大于平均距离，有时又比平均距离小一些。

月球的直径比地球直径的1/4稍大一些，大约是3467千米。各种测量仪器都证明了月球是一个球体，包括最精密的测量也是如此，只是月球表面凹凸不平，非常不规则。

月球的公转和月相

月球不仅绕着地球运动，还伴随地球一同绕着太阳运动。也许你们会认为，这两种运动结合在一起会很复杂，但事实上并非如此。简单举例，想象一下在飞驰的列车车厢中有一把椅子，一个人以1米为半径绕着椅子行走。他可以一直这样一圈又一圈地绕着椅子走，这并不会改变他与椅子之间的距离，火车的行驶也不会对他造成任何不良影响。同样的道理，地球沿着自己的轨道绕着太阳运行，而月球绕着地球转动，月球和地球之间的相对距离并没有出现大的变化。

月球绕着地球旋转一周所需的实际时间，大约是27日又8小时，但从一次新月（朔）到另一次新月之间的时间间隔大约是29日又13小时，这种差异是由地球的绕日运动引起的；或者说是太阳沿着黄道的视运动造成的，两者实际上是一回事。

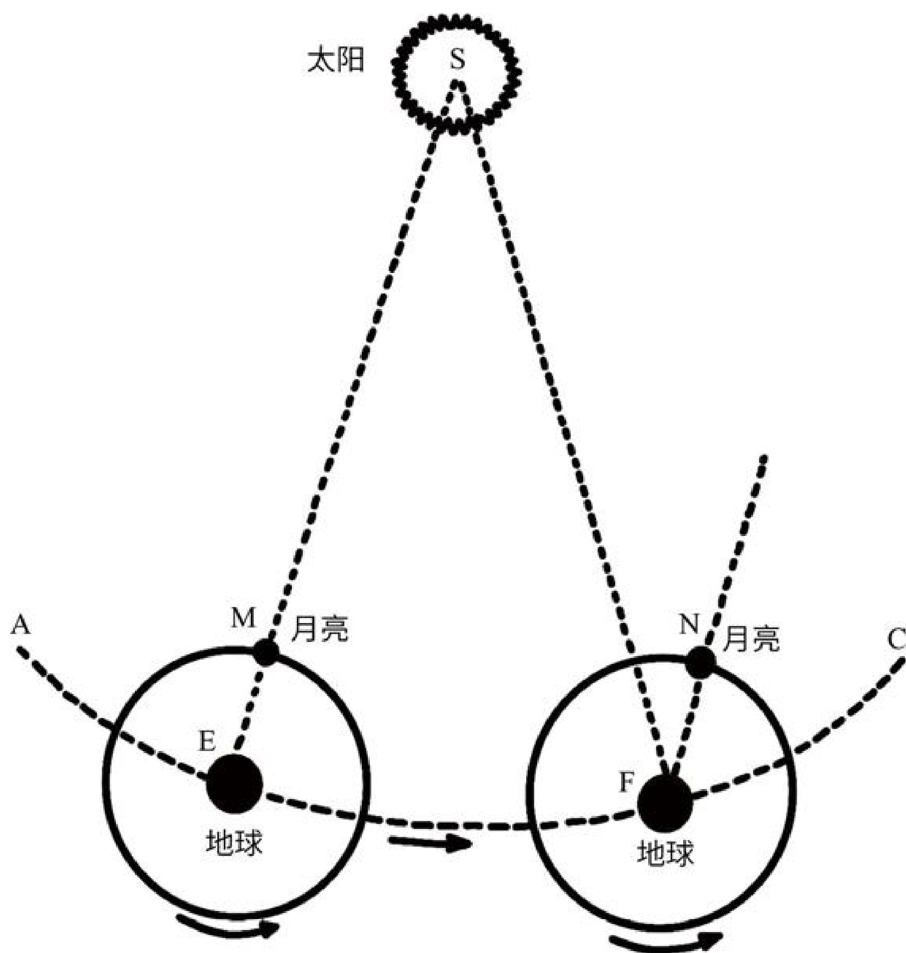


图3–2 太阳、地球和月球的相对位置

图3–2能够说明这一点，图中AC两点连成的弧线是地球绕日公转轨道上的一段，假设某个时刻地球位于E点，月球正好位于在太阳和地球之间的M点，经过27日又8小时，地球从E点运动到F点，当地球绕着太阳运行时，月球也如箭头所示的方向绕着地球运动到达N点。此时，直线EM平行于直线FN，月球已经绕着地球转了一周，看起来又回到了之前在星辰中的位置，但此时的太阳在FS这条直线上，所以月球还需要继续运行，才能回到地球和太阳的连线上，月球走完这段路程需要的时间是两天多一点，所以两次新月之间的时间间隔就变成了29日又13小时。

月球相对太阳的位置决定了月相的不同。由于月球是不透明球体，无法自己发光，因此我们只能在太阳照到它时看见它。当月球位于地球

和太阳之间时，它的黑暗面对着我们，我们就看不见它了。历书中将位于这个位置的月亮称为“新月”，但通常在接下来的两天我们还是看不见月亮，因为黄昏暮色的微光将它遮住了。等到第二天或第三天时，我们会看见月球被太阳光照亮的一小部分，呈现出一弯纤细的蛾眉形状，我们通常将之称为新月，尽管这比历书中的新月要晚一些。

几天之后，在这个位置的月亮又会发生新的变化，黑暗的部分闪烁着微弱的光，这些微光是从地球反射到月球上的光线。如果有人在月球上生活，他看见的地球就像一轮蓝色满月挂在空中——尽管实际上比我们看到的月亮大得多。月球在自己的轨道上日复一日地继续前进，这部分的微光随之逐渐减少，大约上弦月时消失不见，这是因为月球的光在不断增强而地球的光在逐渐减弱，下弦月时也是如此。

在历书中的新月之后七八天，就是月亮的上弦期，这个时候我们看到了半个被照亮的月面。接下来的一周中，月相被称为凸月；新月后的第二周结束（望），月亮恰好对着太阳，我们看到了月球的整个半球，像一个圆盘，这就是满月。这之后，月球的月相会以相反的顺序出现，这是大家都知道的事情了。

可能我们会认为这些反复出现的事情太平常，已众所周知，不值得讲述。然而，《古舟子咏》[6]中曾描述过，在蛾眉月的两个尖端之间出现一颗星星，好像那里没有黑暗的天体阻挡我们的视线而根本看不到星星一样。也许不止一位诗人曾这样描写过东方天空的新月，又或者傍晚西方天空的满月——虽然满怀诗意，但这种景象显然无法出现在现实中。

月球的表面

仔细观察，我们用肉眼就可以看到月球表面明亮和黑暗两个区域。月球的黑暗区域常常被我们想象为一个略模糊的人脸，眼睛和鼻子尤为明显，也就是著名的“月中人”。就算是用普通的望远镜也能看出月球表面凹凸不平的地形，倍数越高的望远镜看到的细节越多。首先是月球表面隆起的高地，或者称之为山，这些地形的最佳观测期是在上弦月或下弦月时，那时日出或日落照射出来的长影，可以让我们更清楚地看到隆起的高地。满月时就不容易看清了，因为太阳光几乎直射在月球表面，

将所有东西都照亮了。虽然我们将隆起的高地称为“山”，但它们多数的形状都与地球上的山完全不同，更类似于地球上大火山的火山口。圆形堡垒是月球上这些山最常见的形状，直径常常达好几千米，周围的壁高约1千米，中间非常平坦，所以这些山又叫作环形山。在许多月球环形山的中央，有一个或多个拔地而起的山峰。在上弦月时，我们能够看到这些山壁和山峰的影子投射到堡垒平坦的中央。

早期通过望远镜对月球进行观察的观察者认为，那些黑暗部分是海洋，明亮部分则是陆地，之所以会产生这种想法，应该是基于黑暗部分看起来比其他区域光滑。于是，他们为这些假想的海洋命名，如雨海（Mare Imbrium）、澄海（Mare Serenitatis）等，尽管这些名字都是幻想出来的，但一直保留到现在，用来表示月球中的黑暗部分。望远镜技术的不断进步让人们看到的细节越来越多，并逐渐发现“黑暗部分是海洋”的说法是错误的，形状的不同是由于月球表面的物体影子的明暗程度不同，而“海”只是月球上地势比较低洼的平原。探月卫星和人类登月计划的实施，让我们可以亲眼看到月球表面的大小石块和各种大环形山，我们也已经知道，月球表面的“海”的地形大约占16%，它们是由火山迸发出来的炙热岩浆形成的，而月球表面的其他部分覆盖着灰土尘埃和流星撞击形成的石头碎片。

月球上最显著的景物之一，是某些地方放射出来一些明亮的长长的光线，普通望远镜就能观察到这个现象；我们所看到的这一半月球的南部附近有一座环形山叫作第谷环形山（Tycho），这座环形山旁边就有许多向外发射光线的点，看起来就好像月亮上有了空隙，而融化的白色物质像从空气中喷出来一样。于是有人推测，月球上曾经发生过大规模的火山喷发，只是后来都渐渐消失了。不过，至今还不清楚这些线状辐射纹是如何形成的，有人猜测可能是陨石撞击月球表面留下的。

月球上是否存在空气和水是有关月球的最重要的问题之一，当人类还没有实现登月时，科学给予的答案是否定的。倘若月球有大气层，那么它的密度即使只有地球大气密度的1%，当星星掠过月球时，星光也会折射出大气的存在。不过，我们从来没有观测到这种折射现象。如果月球上有水的话，也一定隐藏在看不见的凹处，或流淌在月球内部；假如赤道上有水存在，那么肯定会反射太阳光，我们很容易就能观察到。月

球探测器和登月宇航员都证明了月球上并没有空气和水，说明科学家给出的答案是正确的。

上述内容好像又解决了另一个问题，即月球是否适合生存。因为地球上的所有生物都依靠空气和水维持生命。

由于月球上没有空气和水，所以形成了一种与地球上截然不同的环境。目前最细致的勘察表明，月球表面除了遭受太空陨石的撞击之外，从未发生过任何变化。地球表面的石头一直受到气候的摧残，经年累月地风吹雨蚀，慢慢变成了沙子和土壤，这就是大家熟悉的风化。但月球表面并没有这样的气候变化，这里的一块石头可以在千万年中保持原样。当太阳照射着月球时，月球表面的温度非常高，等到日落之后月球表面的温度会迅速降低，变得非常冷——因为没有大气层保持温度，所以在太阳落下之后，温度的下降在短时间内就完成了。在月球表面除了温度变化和流星撞击之外，绝对会非常平静，这里没有风，没有雨，没有气候，没有阴晴变化，没有朝阳晚霞，没有四季变化，除了偶尔降落的流星之外，再也没有任何东西，这就是死气沉沉的月球。

月球的自转

月球是否绕着轴自转这个问题在古时曾引起许多争议，所以我们需要解释一下。仔细观测过月球的人都会发现，月球对着我们的永远是同一面，这表明月球的自转周期等于它绕着地球的公转周期。正是因为这样，所以有些人认为月球不会自转，这种错误的想法源于运动概念的不同。在物理学中，我们判断一个物体是否旋转的方法是将一根直线穿过转轴外的任意一个地方，假如这根线的方向不会发生变化，我们就认为这个物体没有旋转。同样的道理，我们假设有这样一根线穿过月球，如果月球没有自转，那么这根线的方向永远不会改变，无论月球位于围绕地球公转轨道的哪个位置都是如此。我们认真观察一下图3–3中的变化，就会发现如果月球不自转的话，我们将会看到月球表面的各部分，而不是一半。

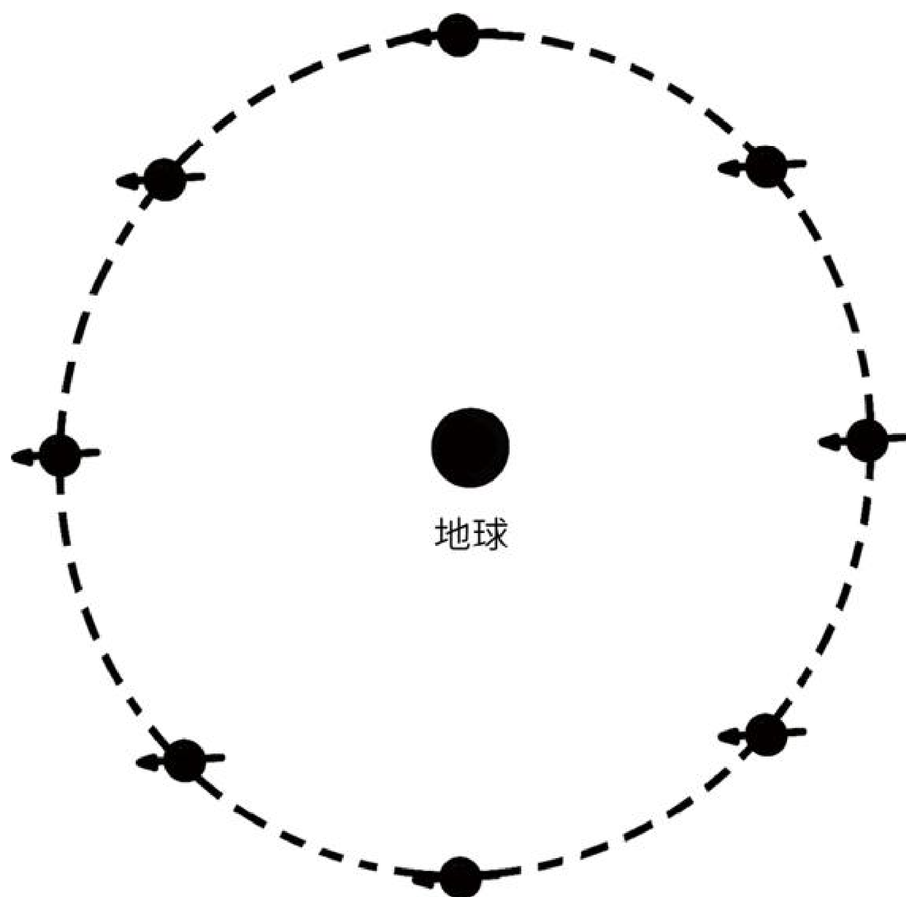


图3–3 月球公转轨道

月球如何引发潮汐

生活在海边的人都对大海的潮涨潮落非常熟悉。一般来说，海潮的涨落规律恰好与月球的周日视运动相符，高潮时期就是月球经过当地子午圈之后的45分钟；换句话说，如果月亮在某个地方的上空时正好是涨潮时期，那么月亮再次到达那里时还是涨潮时期，月复一月，年复一年，都是如此。我们知道这种潮汐是由月球对海水的引力造成的，月亮在海洋上空时便会吸引当地的海水，难以解释的是为什么一天会出现两次潮。不仅面对月亮的地方有，背对月亮的地方也有。回答这个问题之前，我们先来回顾一下上文中说过的关于引力的内容，引力大小和距离的平方成反比，也就是说，距离月球越近，受到的引力越大，反之亦然。因此，地球面对月球的一面受到的压力更大，而地球背对月球的一

面受到的引力较小。这种差异使得地球的受力不均，好像有一股力量将地球拉扁了，而扁的方向正是正对和背对着月球的方向，也就是潮汐了。

如果想对这种情况进行详细解释，就会涉及一些运动定律，这不是我们这本书要讲的内容，所以就不深入讨论了。不过，需要补充的一点是，如果月球只对地球的一个方向产生引力，那么不久之后它们就会撞在一起。由于月亮围绕地球转动，引力的方向一直在变化，因此一个月的时间仅仅能让地球远离平均位置5000千米左右。

可能有些人会猜测，既然潮汐是这样产生的，那么应该月球经过子午圈之后出现高潮，而月球在地平线上则形成低潮。但事实并不是这样，因为首先，地球上的巨大水体造成的强大惯性，使潮汐现象的出现比月亮位置的相对变化晚一些，等到月亮离开子午圈之后，潮汐现象还会持续下去，这类似于一块石头被扔出去后会继续向上运动，或水的动力会推动波浪高于海岸。其次，是大陆对海潮的影响，海潮遇到大陆之后，方向会发生变化，而方向的转变需要时间。因此我们对比各地潮汐就会发现它们并不规则，但延迟时间大约是我们在前文中提过的45分钟。

与月球相同，太阳也会引起潮汐，但效果并没有这么明显，如果你感兴趣可以参考我们曾经说过的数据和方法，根据引力的平方规律算出引发潮水的能量，还能比较太阳和月球引起潮水能力的区别。需要注意的是，在新月和满月的时候，月球和太阳的引力会在同一条直线上形成合力，所以会出现最高潮和最低潮。只要是住在海边的人们都非常熟悉这种情况，他们将之称为大潮（spring tide）。在上弦月和下弦月的时候，太阳的引力抵消了月球的部分引力，所以海潮不会涨得很高，也不会落得很低，这被称为小潮（neap tide）。

月食

月食的成因是地球的阴影遮住了月球的光芒，而日食的成因则是月

球位于太阳和地球之间，明白了这一点，接下来我们就讨论一下月食和日食的出现规律，以及这两种现象中几个有趣的方面。

既然地球的阴影永远位于背对太阳的那一面，那为什么不是每次满月时都会有月食出现呢？答案很简单，月球通常在地球阴影之上或之下经过，所以不会被阴影挡住，也就不会形成月食。因为月球轨道并不与黄道平面平行，大约有5°的夹角，但地球在黄道平面上运行，地球的阴影中心就在黄道平面上。如同我们以前所设想的那样，将天球上的黄道画出来，进一步假定，将月球在天球上的视运动轨迹（白道）也画出来，这时，我们就会发现月球轨道和太阳轨道相交于相对的两点，交角的度数大约是5°，相交的两点被称为交点（node）。在其中的一个交点上，月球从下面移动到了上面，或者说从黄道南端逐渐移动到黄道北端，这个交点就被称为升交点（ascending node）。在另一个交点上，月亮的移动刚好反过来，这个交点被称为降交点（descending node）。

由于太阳要远远大于地球，所以地球的阴影（也就是本影）呈圆锥体，锥顶一直延伸到很远的地方。在地球身后地月距离处，锥体阴影的截面直径大约是地球直径的3/4，约为9600千米。由于阴影中心位于黄道平面上，在地球正后面的月球轨道上，所以阴影只能遮挡黄道平面上下各4800千米左右。在两个交点之间，月球轨道偏离黄道平面最远的两个点和黄道平面之间的距离约为地月距离的1/12，约32000千米。因此，只有月球位于两个交点附近，而且恰好在地球后面时才能被地球的阴影区覆盖。

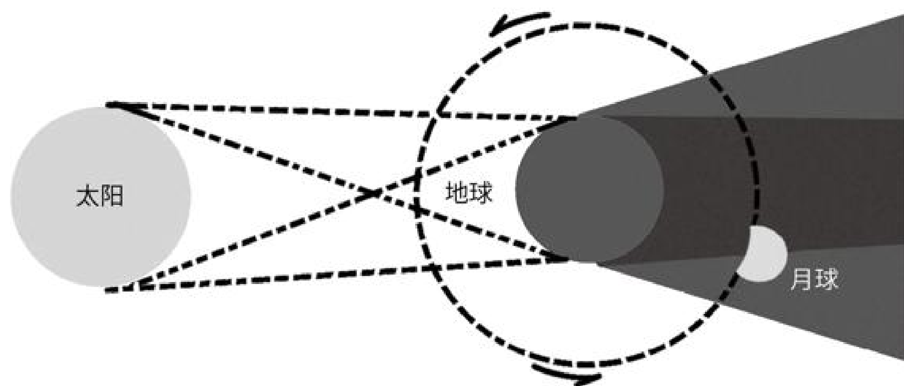


图3–4 月球在地球暗影中

食季

连接太阳和地球的线会随着地球绕着太阳的转动而改变方向，因此，它在一年之中会两次经过黄道平面和白道平面的交点。也就是说，假设我们将两个交点画在天球上，升交点在一个地方，降交点在另一个地方，那么在一年之内，太阳沿着黄道平面向东的运动会经过这两个交点。当太阳经过其中一个交点时，地球的阴影会覆盖另一个交点，一年中日食或月食大约只会出现两次（每隔半年出现一次），这种食季（eclipse seasons）通常会持续一个月；也就是说，从太阳接近交点足以产生日食，到太阳远离交点而不能产生日食，大约是一个月的时间。

如果黄道平面和白道平面的交点在黄道上固定不变，月食只能出现在某两个月。不过，由于太阳对地球和月球的引力作用，随着地球和月球的转动，交点的位置会向相反的方向移动。经过18年又7个月的时间，两个交点都会绕着天球向西旋转一圈，而食季在相同的时间内会倒转一年，平均而言，每年比上一年要早19天。

月食现象

如果我们在月食开始时就对月亮进行观察，就会发现月亮东边的一部分逐渐变得暗淡，最终会消失不见。随着月亮在其轨道上前行，月亮表面慢慢被阴影遮挡住，黑暗部分会不断增大。不过，假如我们认真观察，就会发现遮盖在阴影之中的部分并没有彻底消失，只是散发出的光线非常微弱。如果阴影将月球全部遮盖住，就形成月全食；如果只是遮盖了一部分，则是月偏食。月全食时，照在月食上的光线清晰可见，因为此时它不会受到其他明亮部分的干扰。由于地球大气会产生折射（在前面的章节中已详细讲述过），所以形成了这种暗红色的光线，正因为这样，那些经过地球边缘，或经过地球表面附近的太阳光线，大部分受到折射作用进入阴影中，然后被投射到月球表面上。这种光线的红色与落日的红色的形成原因相同，大气层吸收了波长较短的绿色光线和蓝色光线，而波长较长的红色光线则穿过了大气。

每年都会出现两次或三次月食，其中至少有一次几乎是月全食。当然，地球上的人们并不是每次都能看见，而是当时位于月光下半球的人

才能看见。

我们可以想象，如果发生月食时有人站在月球上看到地球造成的日食，那么我们描写的这些现象在他眼中会非常清晰。在月球上观察地球的目视大小绝对要大于我们看见的月亮，直径大约是我们看见的太阳直径的四到五倍。一开始，由于受到太阳光的影响，这么大的物体在接近太阳时是看不清楚的。观测者观察到的是看不见的球体挡住了一部分太阳光，等到太阳光被全部遮住时，观测者就能看见地球的轮廓。由于周围是地球大气层折射形成的红色光环，等到太阳光彻底消失之后，将剩下一个明亮的红色光环包围着的一个暗淡球状物，也就是地球。

月食现象和日食现象有着很大的区别，我们将在下一节中讲述日食。月食发生时，地球被月光照耀的整个半球都能够看到。如果在月亮升起时已经开始侵蚀月球，我们将会看到一种奇特现象：当同一时刻月亮出现在东地平线上时，夕阳会出现在西地平线上。这种奇特现象似乎与我们说过的太阳、地球和月球位于同一条直线上的情形相互矛盾，这种奇特现象是由于其中之一处于地平线之下，在地球大气层的折射作用下，我们可以同时看到太阳和月亮。

日食

如果月球刚好运行在黄道平面上，那么每次新月都会经过太阳面。但是，我们在前面已经讲过，由于它的轨道是倾斜的，所以只有太阳正靠近黄白交点之一时才会出现这种情况。假如此时我们恰好位于适当的位置，那么就可以观赏到日食，如图3–5所示。

假设月球经过太阳面，遇到的第一个问题就是，月球能否完全遮住太阳面。这不仅与两个天体的真实大小有关，更重要的是还与视觉大小有关。我们知道太阳的直径大约是月球直径的400倍，同时，太阳与地球的距离也是月球与地球距离的400倍。于是，出现了一个非常有趣的现象：在我们看来，这两个完全不同的天体却如双胞胎一般大小。月球公转轨道并不是规则的圆形，这导致月亮看起来时大时小。大的时候可

以将太阳完全遮住，小的时候就无能为力了。

在任何看得见月亮的地方看到的月食情形是相同的，而日食却取决于观测位置，这也正是月食和日食的最大区别。最有趣的日食是月球中心恰好覆盖住太阳中心，被称为“中心食”（central eclipse）。想看到这种日食，观测者需要在连接日月中心的那根直线所在的位置上。假如此时月球的视界大于太阳，就会将太阳完全遮住，这就是日全食（如图3–5）；假如此时太阳的视界大于月球，形成中心食时月球就会被一圈太阳光环绕，这就是日环食。

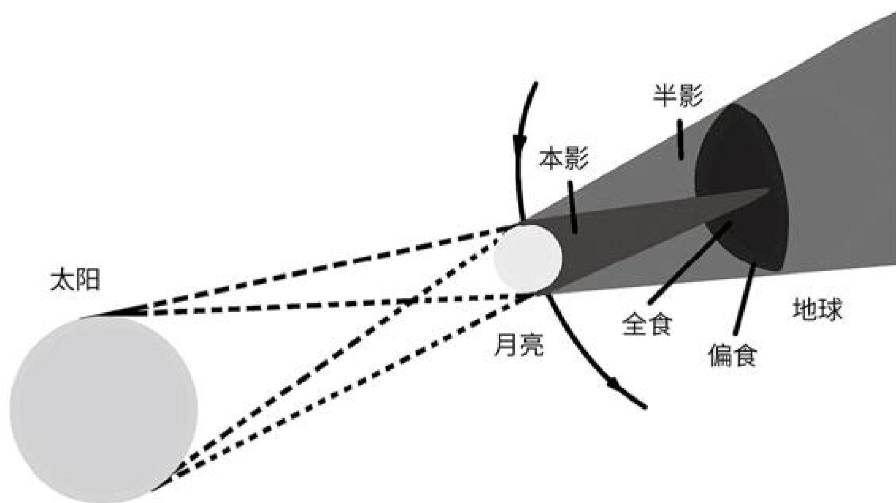


图3–5 日食示意图

我们可以在地图上画一条线，用来表示连接太阳和月球中心的直线掠过地球表面时的路径。这种描绘日食区域和路线的地图出现在航海历书中。在中心线穿过的路径南北160千米以内的地区，也可以看到日全食或日环食。位于160千米以外的观测者就只能观赏月亮遮住部分太阳的日偏食，而在更远地方的观测者想看到日食就完全不可能了。

迷人的日全食

日全食是大自然馈赠给人类的动人美景。要想充分欣赏日全食的迷人之处，最好站在高地上，能看得很远且刚好朝着月亮出来的那边。第一个看到的不同寻常的迹象出现在太阳圆面上，而非地面或空气里。当

历书中预测的某个时刻来临时，一个小小的缺口便会出现在太阳的西部边缘。缺口慢慢增大，似乎正在一点点地吞食太阳。难怪某些未经过文明开化的民族会将太阳这样逐渐消逝幻想为龙正在吞食太阳。

在接下来的一段时间，或许是一个小时，我们眼中的情景都只是月亮的黑影在不断地扩大，逐渐将太阳面上的地盘占为己有。此时，如果观测者站在大树旁，并且光线穿透树叶间的缝隙，就会看到投射到地面的影像里显出偏食的太阳，这真是有趣的现象。不一会儿，太阳就如同新月一般了，还是一轮逐渐缩小的新月。不过，眼睛在这个时候还是适应了逝去的光辉，因而在新月变得极为狭小之前，这暗影仍旧依稀可见。如果观测者的望远镜，带有专门用于观测太阳的滤光镜，那就可以借着仅存的太阳发出的与平常一样柔和且一致的光辉，从另一角度观测月亮上的山，这绝对是一个极好的机会。然而，月亮上山的轮廓在被月面蚀去的那一边却参差不齐。

当新月即将消失时，在一直向前推进的月亮上，陡峭的山峰也将到达太阳的边界，从月面的凹处透出仅存的一串碎片或光点。这时的太阳犹如一枚闪耀着光芒的钻戒，这便是仅存一两秒、随后就完全消失的迷人的“贝利珠”景象[7]。

由于日光消逝，原本的白昼竟宛如黎明前的黑夜，漫天的繁星竟也可以在离太阳稍远的天空中见到，这无疑是一场奇观！极黑的月球高高挂在天上，取代了本应在中天的太阳。一圈灿烂的光辉——也就是我们之前提到过的日冕——环绕在月球四周。尽管这样的光辉以肉眼看来也极为明亮，但若使用低倍望远镜看到的效果会更好，哪怕只有一副看戏用的小望远镜也能将就。这景象最美的一部分在大望远镜中是无法呈现的，因为只能观测到日冕的一部分。所以，从这个角度讲，一副放大10倍或12倍的便宜的小望远镜反而更实用。它不但有利于我们观测日冕，还能使我们见到日珥——那犹如从黑暗的月亮上喷射出来的、形状各异的红云——四处盘旋起落。

古代的日食

需要注意的是，尽管古人对日食现象的认识很清楚，并知道其发生

的原因，甚至能预测出日食发生的周期，但日食这种现象在古代历史学家的著述里却很难找到真实的记载。就算是在古代的中国编年史中，也只是对某时某地发生的日食现象常有记载，然而却未详述其特点。亚述学家（Assyriologist）不久前在古文件中考证出一段记载，是关于公元前763年6月15日发生于尼尼微（Nineveh）的日食。天文年表也证实，当时尼尼微以北约160千米处的确有日全食的阴影经过。

古代最为著名且争论最大的一次日食应该是泰利斯日食（eclipse of Thales），其主要历史依据源于古希腊史学家希罗多德（Herodotus）的记载。据说，在吕底亚人（Lydians）与米堤亚人（Medes）交战时，天色瞬间变暗，两军被迫停战却因此促成了和平；也有说古希腊哲学家泰勒斯（Thales）曾将白昼将变为黑夜的预言告诉过希腊人，还具体说明了是哪一年。天文年表证实，公元前585年的确发生过日全食，与提到的那次战争时间非常接近。但是，我们现在已经知道，这次日全食的阴影是在日落之后才到达那场战争的现场的。因此，对于其真相的疑问至今还存在。

食的预测

食的出现有一个奇怪的规律，这在古代就已经知道。日月都是历时约6585日又8小时或18年又11日的周期之后，再回到交点及近地点的相对位置上，这个时间段被称为沙罗周期（saros cycle）。一个沙罗周期之后各种食都开始重现。例如，1900年5月出现的日食被认为是发生在1846年、1864年及1882年的日食的再现。但是，当一次食再次出现时，在地球上的同一地点却看不到了，这是因为周期中多出了8小时。在这8小时中，地球绕轴自转了1/3圈，能看到食的区域因此发生了变化。每一次食发生时，能看到的区域都在前一次看到的区域的西面，相距1/3球面的距离，或经度相差120°。只有在经过三次重现之后才会回到差不多相同的位置。与此同时，月亮的运行路线也发生了变动，因此阴影覆盖的区域会较以前出现南移或北移。

全世界大约每三年会有两次日全食的可见时间，但一些特定的地区平均300年才可以见到一次日全食。在20世纪百年内的无数次重现中，日全食的时长一直在增加，1937年、1955年和1973年全食出现的时间

都超过了7分钟，日全食时间最长限度达到了7分半钟。

日冕

日冕只有在日全食时才能见到，也是日全食最美丽的部分。日冕由极端稀薄的气体构成，当真正的全食出现时，太阳周围的这种珠光随之产生，之后又与全食一同消逝。从天文仪器拍摄的日冕照片上可以看到其错综复杂的结构，形状上却会明显跟随太阳黑子数目的增减而变化。

在太阳黑子高峰期时，日冕在太阳各方向上的范围基本一致，这时的日冕犹如一朵向盆外各方向展开花瓣的天竺牡丹，其他时候则如同暗弱的流光以及红色日珥上的精致拱门。

日冕在太阳黑子数量最少的时期，犹如从两极生出弯向赤道的短穗，很容易让我们想起放在磁石上的纸上散布的铁屑。日冕还有一种特别的形状：向赤道部分展开的长的流光，就好像鸟的双翼。

如果只是将日冕当成美景观看，它一定在天界优等奇观排行榜的前列，但论及对天文学的贡献，日冕到目前为止却非常让人失望。诚然，日冕在我们眼中是极其难得的，即使看到也会如昙花般转眼消失。人类在过去一百年中拍摄到的全食的精美照片已足够我们长期研究，这种研究的结果也只是回馈了我们日食观测团所花费的时间、精力和金钱。日冕能否带给我们超出前述研究的更重要的信息，尚未可知。

1　截至2019年发现的卫星数量。——编译者注

2　意大利天文学家伽利略于公元1610年首次通过望远镜观测到太阳黑子，而在我国史书中也有丰富的黑子目视记录，仅正史就有100多次。现在公认的世界上第一次明确的黑子记录是公元前28年由我国汉朝人观测到的。在《汉书·五行志》里这样记载：“成帝河平元年三月乙未，日出黄，有黑气，大如钱，居日中央”。——编译者注

3　势垒：物理学术语，也称位垒，指在PN结由于电子、空穴的扩散所形成的阻挡层，两侧的势能差。——编译者注

4　威廉·汤姆森（William　Thomson），第一代开尔文男爵（1st　Baron　Kelvin），英国数学物理学家、工程师。也是热力学温标（绝对温标）的发明人，被称为热力学之父。——编译者注

5　比重也称相对密度，固体或液体的比重是指该物质（完全密实状态）的密度与在标准大气压下的比值，气体的比重是指该气体的密度与标准大气压下空气密度的比值。液体或固体的比重说明了它们在另一种流体中是下沉还是漂浮。——编译者注

6　《古舟子咏》（*The Rime of the Ancient Mariner*）是英国诗人塞缪尔·泰勒·柯勒律治（Samuel Taylor Coleridge）创作的叙事长诗。——编译者注

7　贝利珠（Baily's　beads），由英国天文学家埃德蒙·哈雷于1715年第一次发现并报告，弗朗西斯·贝利于1836年对其正确解释，因此这一现象按照弗朗西斯•贝利的名字来命名。——编译者注

第四章 行星及其卫星

行星的轨道及其特点

严格来说，行星围绕其中央恒星运行的轨道是椭圆形的，或者说是略扁的圆形。只是由于扁的程度很小，如果不进行测量，单凭肉眼是不容易看出来的。太阳并非位于椭圆的中心，而是在椭圆的一个焦点上，在某些情况下，例如焦点和中心的距离比较大时，肉眼可以立刻看出来。通过这个距离，我们就能够测量出椭圆的偏心率，但是这个偏心率却比扁的程度要大得多，如水星的轨道偏心率就很大，但其扁的程度却只有0.02。假如我们设定轨道的长轴为50，短轴为49，按照这样的比例测算，太阳到轨道中心的距离是10。

为了对上述问题进行说明，我们可以画一幅太阳系中的天体运行轨道图，并大致画出轨道的形状与相对的位置（图4–1），这样就可以一眼看出，同一轨道在某些点上与太阳的距离更近一些。

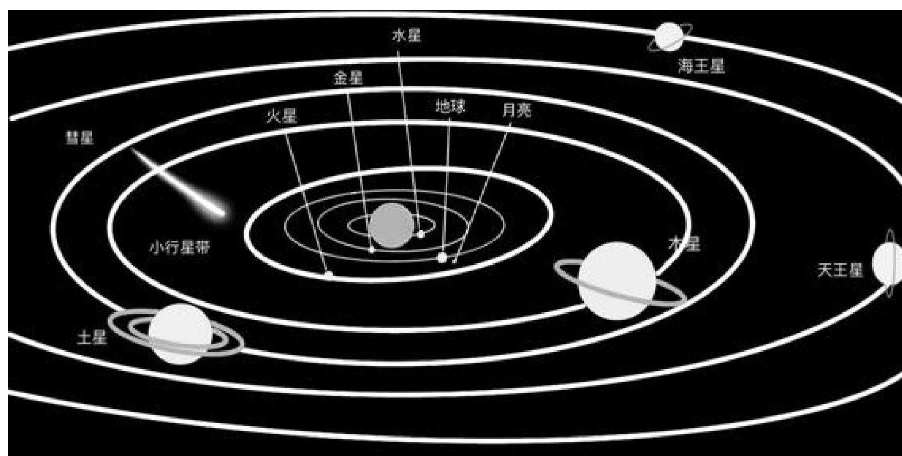


图4–1 太阳系的天体

为了更详细地解释行星的真实运动和视运动，尽管我并不想用一些很专业的术语来打扰读者们的阅读兴致，但仍然希望大家能够花点工夫

来学习了解天文学中的一些概念：

内行星（inferior planet），指的是运行轨道在地球轨道里面的行星，这类行星目前只有水星和金星。

外行星（superior planet），指的是运行轨道在地球轨道外面的行星，这类行星包括火星、小行星以及外层的四大行星。

我们从地球上看，当一颗行星从太阳经过，好像与太阳行进在同一个方向时，我们就将之称为“合”日。

下合（inferior conjunction），指的是行星在太阳与地球之间。

上合（superior conjunction），是指太阳在行星与地球之间。

稍加思考就能明白，外行星是不会出现下合现象的，但内行星既会出现下合现象，也会出现上合现象。

一颗行星在太阳的反方向上时，或者说地球在行星与太阳之间时，称为“冲”（opposition）。冲发生时，行星在太阳落下时升起，在太阳升起时落下。当然，内行星是不会发生冲现象的。

轨道上离太阳最近的一点是近日点，而远日点就是离太阳最远的一点。

当内行星，也就是水星和金星绕着太阳旋转时，它们看起来好像是从太阳的这一边到了那一边。我们能看见的它们到太阳的距离就叫作“距角”（elongation）。

水星绕着太阳运行的轨道偏心率较大，最大距角平均是25°，有时会多一点，有时又少一点。金星的最大距角大约是45°。

这两颗行星中如果有一颗的距角位于太阳东面，那么我们在日落时会看见它在西天；而在太阳西边时，我们会在黎明时东边的天空中见到它。由于这两颗行星与太阳的距离从不会超过上面提到的界限，所以我们也永远无法在黄昏的东边或黎明的西天看到水星和金星。

没有两颗行星的轨道会恰好在同一个平面上，换言之，如果我们沿着一条轨道向水平方向看过去，所有轨道都会向一边或另一边倾斜。天文学家发现，以地球轨道平面，或者说是黄道平面作为水平标准，更便于研究。既然每颗行星的轨道都以太阳为中心，那么也都和地球轨道一样，在同一水平面上有两个相对的点，再准确一点说，这些点就是行星轨道与黄道平面相交的两点，这两点又被称为“交点”。

行星轨道与黄道平面形成的夹角被称为“轨道交角”（inclination of orbit），水星的轨道交角最大，约为7°；金星的轨道交角约3°24′。外行星的轨道交角就更小一些了，从天王星的46′到土星的2°30′不等。

行星的距离

除海王星以外，其他行星之间的距离基本都与提丢斯–波得定律（Titius-Bode law）相符，这个定律是以首先提出这一观点的天文学家的名字来命名的，定律的内容是选取0、3、6、12、24等类似数字，从第二个数字开始，后一个数字是前一个数字的两倍，然后再加4，就得出了行星的大致距离，如下表所示：

行星名称	算法	实际距离
水星（Mercury）	0+4=4	4
金星（Venus）	3+4=7	7
地球（Earth）	6+4=10	10
火星（Mars）	12+4=16	15
小行星	24+4=28	20~40
木星（Jupiter）	48+4=52	52
土星（Saturn）	96+4=100	95
天王星（Uranus）	192+4=196	192
海王星（Neptune）	384+4=388	301

表4–1 行星的距离及算法

关于表中的实际距离这一项，我们需要说明，天文学家在表示天体

间的距离时，并没有用“千米”这种描述长度的单位，这基于两种原因：首先，千米这个我们常用的计量单位相对行星间的距离而言实在太短了，用它来表示天体间的距离就好像以厘米为单位丈量两座城市间的距离一样；其次，用我们平时使用的长度单位来表示天文学上的距离，会对其精确性产生影响。如果将太阳到地球的距离作为衡量标准，那么就可以很准确地确定行星间的距离。因此要得到天文学中的行星与太阳之间的距离，上述表格中实际距离的数值需要除以10，或者将每一个数值的小数点提前一位。

在上面的表格中，为了不让读者产生困扰，我们没有用不必要的小数。实际上，水星的距离是0.387，其他行星的距离我们就不一一列举了，只将水星的距离算作0.4，再乘以10，以便与提丢斯–波得定律相比较。

开普勒定律

除了距离，行星在轨道中的运动也是有一定规律的，这个规律是由开普勒发现的，因此也被称为“开普勒定律”（Kepler's law）。我们在前面提到过，行星轨道是椭圆形的，而太阳位于椭圆的一个焦点上就是开普勒定律的第一条。

开普勒定律的第二条：行星离太阳越近，其运行速度越快。以数学语言更准确地表述，应该是在相同的时间内，行星与太阳的连线所扫过的面积相等。这样，我们很容易就能弄清楚，当行星和太阳之间的距离较近时，为了能在相同的时间内让连线扫过的面积相同，行星就需要运行得更快。

开普勒定律的第三条：行星和太阳之间平均距离的立方与行星公转周期的平方成正比。这条定律需要简单解释一下，假设一颗行星到太阳的距离是另一颗行星的4倍，那么它绕太阳的运行周期将是另一颗行星运行周期的8倍。这个结果的算法是，先求出4的立方为64，再求出64的平方根，就得到8。

天文学家用地球和太阳之间的平均距离作为量度单位来表示太阳系中的距离，因此得出内行星的平均距离是不到1的小数，跟我们前面讲

述的一样，而外行星的距离在木星的5.2到海王星的30之间不等。如果我们先求出这些距离的立方数，再求出它们的平方根，就可得到以年为单位的行星的公转周期。借助上面给出的资料，有兴趣的读者可以很方便地算出每颗行星的公转周期。

我们还发现，越靠近外层的行星，它们绕轨道运行的周期就越长，不仅因为其路线更长，还因为本身速度就慢。如果按照我们前面设定的例子，外行星到太阳的距离是原来的4倍，那么它的运行速度将只有原来的一半，运行一圈需要的时间也就是另一颗行星的8倍。我们已知地球绕太阳的公转速度大约是每秒29.8千米，海王星的公转速度是每秒5.6千米，而它的运行轨道长度是地球的30倍。这也是海王星围绕太阳公转一周需要160多年的原因。

需要特别注意的是，开普勒是在第谷留下的资料的基础上，花费了无数精力，凭借观察和无限的想象力才得出了开普勒三定律，并将其发表于他在1619年出版的著作《宇宙和谐论》（*Harmonices Mundi*）中。一个世纪之后，牛顿从另外一条途径得出了这个结论，并借助引力定律的知识，纯粹从数学上得到这三条结论，不过这可能是任何一个高中生都可以做到的事。

水星

接下来，我们将按照行星和太阳之间的距离远近，依次叙述我们所知道的大行星的知识。第一颗就是水星，它不仅是离太阳最近的一颗行星，也是八大行星中最小的一颗；之所以能将它列入大行星的行列中，完全是由于它所处的位置。水星的直径只比月亮的直径大50%，但因为体积与直径的立方成正比，所以水星的体积是月亮的体积的三倍多。

水星的轨道偏心率是大行星中最大的，但在我们后面会讲到的小行星中，有一些小行星在轨道偏心率方面要超过水星。因此它到太阳的距离远近也发生了很大的变化，它的近日点距太阳不到4700万千米，远日点距太阳则超过了6900万千米；它围绕太阳的公转周期不到3个月，准

确地说是88天。因此，水星在一年之中会围绕太阳公转四圈有余。

在地球绕太阳一圈的时间中，水星已经围绕太阳公转了四圈多，很明显，水星合日一定会有规律地出现，尽管时间间隔不一定完全相等。为了说明水星视运动的规律，我们假设图4–1中的内圈代表水星轨道，外圈代表地球轨道。当地球在E点，而水星在M点时，水星与太阳下合。3个月之后，水星再次回到M点，但不会出现合日，因为同样的时间中，地球也在其轨道上向前运行。当地球到达F点，而水星到了N点时，会再次与太阳下合。这种从一次下合到另一次下合的周期运动就叫作行星的“会合周”（synodic revolution）。水星的会合周比实际公转周期长约1/3不到，也就是说弧MN略小于圆周的1/3。

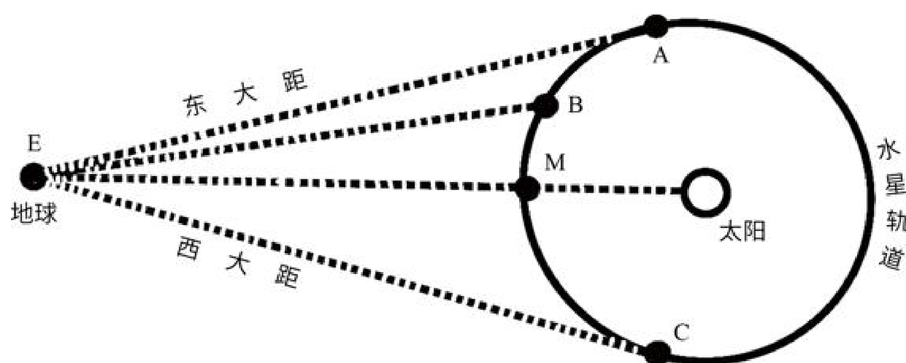


图4–2 水星距角示意图

现在假设当地球在E点，水星不在M点而差不多到了最高处的A点上时，如图4–2所示。这时从地球的角度看上去，水星与太阳的视距离最大，如果用专业术语描述，即在“大距”（greatest elongation）上。如果水星在太阳的东边时，就会在太阳之后沉没。我们可以在日落后30分钟至60分钟内，在西边淡薄的云雾中看到水星明亮的身影。在相反方向的C点附近，水星就到了太阳的西面，此时它在日出前升起，闪耀在东边天空的晨曦中。所以，把水星当作黄昏的星辰来看时，东大距（春季）是最好的观测期；当作早晨的星辰来看时，则是西大距（秋季）更利于观测。

水星的外观

如果要观测水星的外观，春季暖和的傍晚或秋天清凉的黎明是最佳时刻。如果水星在太阳东边，通常在下午都可以随时用望远镜进行观测，但由于空气会受到太阳光的干扰，此时的观测效果很难令人满意；而傍晚时分的空气逐渐稳定，更加利于观测。但是在日落之后，大气不断增厚、蔓延，种种对观测不利的因素开始加剧，因此，水星成了所有行星中最难达成如意观测效果的行星，导致观测者对其表面的观测结果也千差万别。

在过去很长的一段时期内，几乎所有观测者都认为水星的自转周期是无法确定的。1889年，斯基亚帕瑞利（Schiaparelli）用精巧的望远镜，在意大利北部美丽的天空中对水星进行了细致的观测，看到的是水星常年毫无变化，他因此得出结论，认为水星永远以同一面对着太阳，正如月亮之于地球一样。洛厄尔（Lowell）通过在亚利桑那州的弗拉格斯塔夫天文台（Flagstaff Observatory）上的观测，也得到了同样的结论。但到了1965年，当时最先进的多普勒雷达（Doppler Radar）表明，上述观点是错误的，现在我们认为水星在公转周期的同时自转三周。

水星对太阳的位置常有变换，就如同月亮一样，有圆缺的位相变化。我们能看到的是被太阳照耀的那半球，但看不到背向太阳的黑暗面。当水星上合时，也就是太阳在地球与水星之间，明亮的那半球会完全对着我们，水星的表面就好似满月般的圆盘。随着它移向下合，向着我们的暗半球部分会越来越多，明半球的部分则越来越少，但由于它和我们的距离在缩短，反而可以更好地观测。到了下合时，暗半球则完全对着我们，如同新月一样，在它应该出现的位置上，只留下了一个无法观测的黑暗阴影。在经过了黑暗的下合期之后，水星经由西大距返回上合的位置，重新成了一轮“满月”。

长期以来，水星上是否存在大气是一个存有争议的问题，多数人持否定意见，因为我们根本就观测不到水星对日光的折射效果。但现在有研究表明，水星拥有稀薄到几乎可以忽略不计的大气层，由太阳风带来的原子构成。水星上的温度被太阳烤得非常高，导致这些原子迅速地逃逸到太空中。就这样，与地球和金星稳定的大气相比，水星的大气会被频繁地补充和更换。

水星凌日

想象一下，如果内行星和地球在同一平面上围绕太阳公转，那么，每一次下合时，我们都会看到内行星从太阳表面经过。但事情并不像想象中那样简单，任何两颗行星的公转轨道都不在同一平面上。水星轨道是所有大行星中与地球轨道的偏斜度最大的，由此导致当水星下合时，我们常常看到它在南边或北边与太阳擦肩而过，如果这个时候它又正好接近了太阳与水星轨道中的一个交点，我们就可以看到水星如一粒黑点从太阳表面穿过。这种现象就叫作水星凌日（transit of Mercury）。水星凌日现象每3至13年出现一次，因为可以非常准确地测定行星进入和离开太阳圆盘的时间，并可以通过这个时间推导出行星的运动规律，所以这种现象引起了天文学家极大的兴趣。

1631年11月7日，加桑迪（Gassendi）第一次观测到了水星凌日，但由于使用的观测仪器非常简陋，他的观测结果到现在已经不具备科学价值。1677年，哈雷（Halley）在圣赫勒拿岛（St. Helena）上也观测到了水星凌日，这次观测虽然也不理想，但比之前的效果好了许多。此后，对水星凌日的观测就开始有规律地展开。以下是水星凌日的发生时间及在地球上的观测点：

1937年5月11日，水星从太阳南部边缘擦过，可见于欧洲南部以及日出之前的美洲。

1940年11月10日，可见于美国西部。

1953年11月11日，可见于美国全境。

自1677年以来，水星凌日的观测成为最困扰天文学界的问题之一。人们发现了一个现在被称为水星轨道进动的有趣事实，它的轨道位置居然在缓慢地发生着改变。一度有观点认为，这是由于受到其他已知行星的影响，但经过精密的理论计算，这并不是主要原因。水星近日点每100年向前移动的距离，比其本应向前移动的距离远了43角秒之多。这一误差是勒维耶（Le Verrier）在1845年发现的，勒维耶因在海王星被发现之前准确计算出其位置而闻名，他认为在太阳与水星之间还存在一颗行星，他将其命名为火神星（Vulcan）。勒维耶通过计算得出，火神

星会很罕见地越过太阳盘面，这时就有希望由它投在日面上的阴影来探测到它。然而，1877年，也就是勒维耶预言的火神星越过日面的时间，他却遗憾辞世。从另一个角度看，这或许又是一种幸运，因为他不用面对自己的失败——那一天，所有的望远镜都对着太阳，但是火神星始终没有出现。1860年，法国的乡间医生勒斯加波（Lescarbault）宣称，他用一架小望远镜观测到了期待中的那颗行星从太阳盘面上经过。而另一位更有经验的天文学家在同一天却只看到一颗平常的黑子，想必就是这颗黑子误导了那位法国的医生天文学家。这场风波之后的很长一段时间，有不少天文学家在好几个地点对太阳进行观测和拍照，却完全没有发现此类天体的存在。

尽管如此，我们还是认为，在上述区域中很可能存在着这类运行的小行星，但由于它们实在太小，所以经过太阳面时没有被捕捉到。如果事实真是这样，它们的光芒将被天光完全遮去，所以平常看不见。但机会还是有的，那就是在日全食期间，天上的光被完全遮蔽以后。于是，观测者常在日全食发生期间寻找它们，并且使用了效果很好的摄影仪。终于，在1901年的日全食时发现了类似的天体，在太阳附近拍摄到了约50颗星，但其中一些很昏暗，只相当于8等星，而且基本都是我们已知的。所以，我们几乎可以确定，在水星轨道圈内，肯定没有比8等星更明亮的星星了。而且，像这样的小行星，除非有几十万颗，否则是不能造成水星偏离轨道的，数量如此庞大的小行星也一定会照得那一片天空比我们见过的都明亮。这一结果可使我们得出结论，水星近日点的移动不可能由水星内的行星造成。要假定这颗内行星存在，除了上述困难外还有一点，如果存在这颗行星，那么它一定会使水星或者金星又或两者交点的位置都发生相似的变动。

各个时期的天文学家都被这个谜团所困扰，直到1916年，爱因斯坦提出了广义相对论。在牛顿的经典力学中，引力是两个具有质量的物体之间的相互吸引作用。但爱因斯坦却凭直觉意识到，引力的作用比我们能想象的更有意思。

在对水星轨道进动做进一步介绍之前，让我们先来做一个有趣的实验，看看爱因斯坦的等价性原理。

假设我们现在请到一位具有无畏精神的助手，然后把他关进一个与外界隔绝的小屋子里。为了让他不至于寂寞，我们给他拿一个小球，当他松开手，让球自由下落时，小球相对地面运动的加速度是9.8米/秒^2，因为这个加速度是地球引力产生的正常加速度，根据这一点，他会判断自己在地球上。

接着，我们在他熟睡后把他送进一架平稳飞行的飞船，船舱的布置与刚刚那间小屋子完全相同。在他醒来之前，我们将飞船发射出去，并且让飞船以9.8米/秒^{2}的加速度往外太空飞去。我们可以想象一下这个人醒来时的情况：他同样松开小球，发现小球相对地板的加速度还是9.8米/秒^2，然后他就得到一个错误的结论，以为自己仍然在地球上，而不是在遥远的外太空。

就这样，我们会发现，从某个角度上说，引力和加速度是可以相互替代的，如果我们选择一个合理的参照系，那么引力就可以转化成一种局部的加速度，这与被吸引的物质是什么没有关系，而与空间本身有关。空间的不同部分，可能由于一个大质量物体的存在而拥有不同的等效加速度，空间也就不再是牛顿经典体系中那种平坦的样子，而是被弯曲了。

空间在太阳附近的弯曲程度比较明显，水星在这个被太阳巨大引力影响而扭曲的空间中运行时，就不再是沿着严格的椭圆轨道，这就造成了水星轨道近日点的进动。按照广义相对论提出的公式精密计算出的结果，恰好比按牛顿经典力学计算出的结果多了43秒，与实际观测到的情形相符合，这也证明了广义相对论的正确性。

金星

金星是天空中所有类似天体中看起来最明亮的一颗，只略弱于太阳和月亮的光彩。在晴朗而没有月光的夜晚，金星的光芒甚至可以照出影子来。如果观测者掌握了金星的准确出现位置，再加上视力超群，那么，只要太阳不在金星的附近，当金星接近子午圈时，就可以用肉眼在

白天观测到。当金星在太阳东边时，我们可以在西天看到它，它的光辉在日落前微弱暗淡，随着日光的减弱，金星的光会逐渐增强，变得明亮起来。当金星在太阳西边时，它会在日出之前升起，我们可以在东天看到它。由于这两种不同的情形，金星又被称为昏星和晨星。在古代，人们将昏星称作长庚星（Hesperus），将晨星称作启明星（Phosphorus）。据说，古人并不知道长庚星和启明星是同一颗星。

通过望远镜观测金星，即使是低倍率望远镜，也可以发现它的圆缺变化，与月亮的位相一样。伽利略第一次用望远镜对金星进行观测时就发现了这一点，由此也坚定了他支持哥白尼日心说正确性的信心。按照当时的惯例，伽利略把他的这一发现以字谜的形式公布于众，谜面是一串字母，英文直译是“爱的母亲正在模仿辛西娅（Cynthia）的面目呢”。

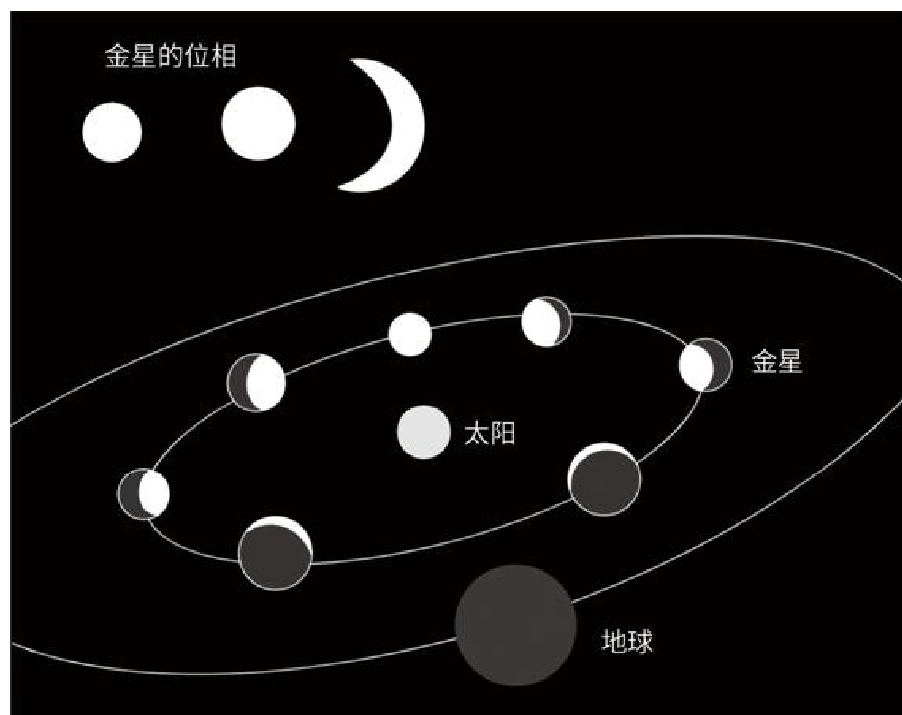


图4–3 金星在轨道各个部分的位相

我们已经在前面讲述过水星的会合运动，金星的会合运动原则上也与水星基本相似，因此不再赘述。图4–3表示的是金星在它的会合轨道不同位置的视大小，可以看出，当金星由上合渐渐到下合时，圆盘在慢

慢增大，但我们并不能看到它的全部，它被照亮的表面也慢慢缩小，先是变成半月形，接着变成新月形，越来越细，最后直到下合期。当金星在下合点时，它的黑暗面转向我们，因此我们无法观测到。金星处于下合与大距的正中时是它最亮的时候，此时，如果金星在太阳的东边，它降落的时间会比太阳晚2个小时；如果金星在太阳的西面，则会比太阳早2个小时升起。

金星的自转

从伽利略研究金星开始，金星的自转问题就引起了天文学家和天文学爱好者的兴趣，但由于金星闪耀着很强的亮光，给这一问题的研究带来了很大困难，颇费了一番周折才得出确切答案。通过望远镜很难看到金星表面清晰的痕迹，只能看见表面略有明暗差异的一团亮光。在望远镜中观测金星，它看起来就好似一个磨得很光又略带锈色的金属球一样。尽管这样，仍然有一些观测者认为，他们能够在这样的观测中分出明暗的斑点。早在1667年，卡西尼（Cassini）就根据这些假定的斑点，推测金星绕轴自转一周的时间不到24小时；18世纪中期，意大利学者布朗基尼（Blanchini）针对这个问题，发表了一篇很长的论文进行讨论，这篇论文图文并茂，内容丰富，得出的结论是，金星绕轴自转一周的时间超过了24天。1890年，斯克亚巴列里则得到一个更为不同的结论，提出金星绕轴自转的周期等于它绕着太阳公转的周期，换言之，金星永远以同一面对着太阳，就好比月亮只有一面对着地球一样。斯克亚巴列里每天花费若干小时进行观测，发现金星南半球上的一些微小的点一直没有移动过，他的观测结果否定了金星大约一天自转一周的论点。洛厄尔在亚利桑那州的天文台经过仔细观察后，也认同了斯克亚巴列里的研究，支持他提出的观点。

上述观察者在认真仔细观察金星表面的特征后，关于金星自转周期这个问题，竟然得出了差异如此之大的结论，这只能归结于这些特征实在都太不明显了。幸好我们目前拥有了功能强大的大型望远镜，得以发现事情的真相：金星自转速度远远慢于地球，一个金星日大约是243个地球日，比金星年还要稍长一些。金星两极并没有如地球两极那样的扁率，地球的高速自转造成了地球的扁率，这从另一个角度也证明了金星

的自转速度比地球慢得多。我们还发现了一个新的有趣的现象，相比地球的自转，金星的自转是倒着的，与地球的自转方向相反，从金星的北极看，它是沿着顺时针的方向自转。另外，金星的自转周期和它的轨道周期是同步的，因此，当它与地球的距离缩小到最近时，它朝着地球的一面总是固定不变的。

金星的大气

现在已经非常肯定了，金星外面包裹着一层厚厚的大气，并且这层大气的密度可能比地球大气层的密度还大。1882年，笔者在好望角观察到了金星在太阳表面经过时出现的一个现象，非常有趣。当金星的大部分从太阳表面经过时，它的外部边缘会变得十分明亮。但这种变化并不是如正常折射引起的那样，从弧的中心点开始出现，而是从接近弧的一端的某一点开始。普林斯顿的罗素（Russell）对这种现象这样解释：因为大气中充满了水蒸气，导致我们无法透过大气层直接折射看见太阳光。我们看见的只是大气中被照亮的一层水蒸气或云朵。如果这就是事实，那么天文学家们在地球上是根本无法透过这层云去观察金星的。因此也进一步说明，那些假设的斑点仅仅是暂时的，且一直在变化。

为了解释这个即便是很优秀的观测者都容易受到误导的现象，我们来列举另一种情况，一部分观测者认为，在金星接近下合时，我们在地球上能够看到它的全部表面，这个时候，金星的样子和月亮在新月出现时的样貌相似，即所谓的“旧月包围着新月”。众所周知，我们之所以能够看见月亮的黑暗半球都是由于地球的反光，但金星不可能反射来自地球或者其他天体的足够的光。也有人认为，金星表面可能覆盖有一层磷光，不过这极有可能只是视觉上产生的错觉而已。我们经常会在白天看见这种现象，那时天空很明亮，如磷光之类的任何微光都是无法看见的。不管我们认为这种光亮是如何产生的，它都应该更容易在黄昏之后被看见，而非在白天。事实上，我们在夜晚什么都看不见，这仿佛说明其与客观事实并不相符。

我们可以用一个著名的心理学定律来说明这个现象，即想象中常常容易夹带看见的类似事物，即使这是并不存在的事物。因为我们对月亮的现象太过习惯，所以在观察金星时，看到相似的情况就将假设的情形

加在了金星身上。

1927年，当金星位于有利的大距时，罗斯通过威尔逊山天文台的大型望远镜，借助红光和红外光拍摄到了金星的样子。照片中金星的盘面几乎是白色的，通过紫外光拍摄的照片上有着清晰的斑纹，这是我们第一次清楚地看见金星上的斑纹，这些斑纹是大气中的云纹，在太阳光照射到金星表面之前，它们可以将大部分的紫外线反射回去。

在照片中，金星盘面的两极上有着明亮的斑点，这些斑点类似于火星上的极冠（polar caps），尽管短暂很多。在圆面上经过的黑带会让我们联想到木星上的云彩，形状能够快速地发生变化。

金星凌日

金星凌日是一种在天文学中很难见到的现象，平均60年才出现一次。在过去和未来的几百年间形成了一个有规律的循环周期，大约在243年间出现过4次金星凌日。金星凌日出现的间隔时间分别是105.5年、8年、121.5、8年；然后又从105.5年开始依次循环下去。过去6次及未来2次发生金星凌日的时间如下：

1631年12月7日 1639年12月4日

1761年6月5日 1769年6月3日

1874年12月9日 1882年12月6日

2004年6月8日 2012年6月6日

在过去100年间，人们之所以对金星凌日感兴趣，是因为假设可以凭此找到测量地球和太阳之间距离的方法。这种假设以及这种现象的罕见性，也是对过去4次金星凌日进行大规模观测的原因。1761年和1769年，众多海洋国家都派出观测者前往世界各地，记录金星进入和离开太阳表面的准确时间。1874年和1882年，美国、英国、德国、法国等国家也都组织了大规模的远程观测团，观察金星凌日现象。1874年，美国在北半球设立的观测点包括中国、日本和西伯利亚；南半球则在澳大利亚、新西兰等地。1882年，美国并没有再派出远征的观测团，因为在美

国境内就可以很好地观察到金星凌日现象。在南半球的观测点，则设在好望角及另外几个地方。这几次观测对于确定金星未来的运动具有重要意义，但随着研究的进一步发展，出现了其他更可靠的方法，因而这方面观测的价值就大大降低了。

火星

近几年，相比其他行星，各国对火星的兴趣越来越大。2004年，美国的“勇气号”（Spirit）和“机遇号”（Opportunity）火星车相继到达火星，这是人类航天史上第一次有两辆火星车在火星表面运行；2012年8月6日，美国“好奇号”（Curiosity）火星车登陆火星，主要任务是观察火星上的环境是否适宜生物生存，显示了火星探测技术的发展水平。火星和地球的相似性以及对于火星上的气候、海洋、河流等的猜测，使我们对火星是否存在生命的可能性产生了浓厚兴趣。接下来，我将努力向大家说明我们对火星实际情况的了解。通过已有的知识判断，火星表面上是没有生命迹象的，至于它的地表和极冠是否存在原始细菌，只有深入研究后才能确定，但我们可以确定地说，火星上没有高级生命存在，这否定了人们曾经的猜测。

我们首先来了解一些火星详细数据吧，这能帮助我们更好地认识这个星球。火星的公转周期是687天，差43天就是两年。假设火星的公转周期恰好就是两年，那么火星公转一圈，地球将公转两圈，火星的冲也将规律地每隔两年出现一次。但火星实际公转得要快一些，所以地球需要用至少1到2个月的时间去追赶它，因此火星的冲发生的间隔时间就会是2年零2个月。多出的这一两个月在经过八次冲之后补足成一年；这样，火星的冲在经过15年或者17年后，将回到最初出现的那一天，同时还原其在轨道中所处的位置。在这段时间内，地球已经绕着太阳公转了15次或者17次，而火星仅仅公转了八九次而已。

火星公转轨道的偏心率较大，冲发生的时间间隔存在约1个月的误差，火星轨道的偏心率在大行星中仅次于水星，为0.093。这个数值接近1/10，因此与水星的平均距离相比，火星在近日点时大约要近1/10，

而在远日点时大约要远1/10。火星在冲位时与地球之间的距离也会围绕这个数值发生变化，而在近日点和远日点的冲的区别就更大了。当冲出现时，如果火星在近日点附近，它与地球的距离大约是5600万千米；如果此时火星在远日点附近，那么与地球的距离要超过9600万千米。这种情况导致火星在便于观测的冲位（八九月份）时的亮度，大约是在不利于观测的冲位（二三月份）的亮度的三倍。

当火星靠近近日点时，由于光亮强烈，璀璨夺目又泛出红色的光彩会明显与众不同，让我们很容易就能辨认出。有些奇怪的是，若通过望远镜观察，火星的红光要比肉眼看见的淡一些。

火星表面及其自转

惠更斯（Huygens）在1659年通过望远镜首先观察到火星表面呈现出复杂多样的变化特征，并且绘制了一幅火星表面图，他在图中所描绘的特征至今依然能够明确辨认出来。通过观测火星的这些特征，可以得知火星自转一周的时间是24小时37分钟，比地球自转一周的时间稍长。

火星的自转周期是除了地球外的所有行星中最准确的，300多年以来，火星的自转周期没有发生过变化，我们也就没有理由怀疑它会在将来出现变动。火星的自转周期和地球的自转周期如此接近，仅仅多出了37分钟，从而导致在连续几个夜晚的同一个小时中，火星呈现给地球的几乎是同一面。不过，由于火星的自转周期比地球自转一周的时间稍长，因而每天夜里火星都会比前一晚落后一点点，40天之后，我们就可以把火星展现给地球的各个部分看遍了。

火星表面的所有已知情况都可以体现在火星地图上，包括它表面的明暗区域以及平时能够见到的包裹着两极的白色冠状物。当极点靠近地球也靠近太阳时，白色冠状物会慢慢变小，而极点远离太阳时白色冠状物又会逐渐增大。虽然在地球上无法看见它是如何变大的，但等到它再次出现在视野里时，我们会发现它比原来大了一些，火星北极冠的直径在1000千米到2000千米之间，厚度在4千米到6千米之间，一直延伸到北纬75°左右，多种火星探测器传回地球的图片表明，大气中的二氧化碳凝结之后，形成了火星上具有季节性的极冠，而始终存在的极冠是由水

滴冷凝而成的，温度是–70℃到–139℃。随着温度的变化，二氧化碳会气化或者凝结，所以极冠的大小一直在变化。随着火星季节的改变，极冠的大小也在发生变化，在火星的冬季凝结在极点周围，在火星的夏季则全部融化或者部分融化。

火星的运河

1877年，斯克亚巴列里宣称在火星上发现了运河，这些所谓的“运河”是火星上纵横参差、从一点经过另一个点的条纹，这些条纹比火星表面略微黑暗一些。人类翻译史上由于翻译失误而引起的误会很多，尤以这一次为最。斯克里亚巴列里把这些条纹称作“canale”，这个单词在意大利语中是“水道”的意思，他之所以这样为它们命名，是因为他当时推测火星表面上的暗区都是海洋，那么这些连接海洋的路线就假定都是有水的，水道由此而生。然而译成英文后的“cancel”是“运河”的意思。这一词义上的小小变动，让所有使用英语的人都以为这些如同人类在地球上开凿的运河一样，是火星居民的功绩。

关于这些水道，一开始天文学权威之间也有争议，原因是这些表面上清晰的条纹在地球上看起来并不是平均一致的，火星上到处都是各种各样的阴影，呈或明或暗的片状，微弱而模糊，从这一块到那一块之间的亮度差异非常小，相互穿插，分不出层次，因此很难说出其准确的形状和轮廓。要分辨出它们已极端困难，加之不同的光照以及地球大气不同的情形，它们的形貌又都在改变。所以，观测者描绘出的水道差异很大，各不相同。在洛厄尔天文台[1]的观测者所绘的图中，这些运河是数量众多的细黑线，织出了一张包住火星表面大部分的网；而在斯克亚巴列里的图中，它们又是有些暗弱的宽阔带状，既没有洛厄尔天文台画出的图那样繁多，也没有那么高的清晰度。洛厄尔天文台的图中有一点很有趣，水道相交的地方都是用深色的圆点标记的，就像一个个圆形的湖。

火星上最清晰可辨的特征之一是一块又大又黑的近乎圆形的斑点，斑点的周围是白色的，这个大斑点被称为“太阳湖”（solis lacus）。所有观测者对这一特征的意见都是一致的，也基本认同从这个湖中延伸出的暗淡模糊的条纹是水道，但更进一步的探究会发现，观测者们对于水道的数目以及周围的地貌特征有不同的看法。火星上的另一特色是著名的

物理学家惠更斯第一个画出的——一块三角形的黑斑“大流沙地带”（Syrtis Major）。

关于火星运河是否存在，人们已早无疑义，它是众多天文学家经过无数次观测，并且成功拍摄得出的。只是大致上，他们所见的比最早的观测者见到的也许更宽阔、更不规则也更不精美一些。我们认为这些“运河”是火星上的自然（非人工）景物，火星上曾发生过洪水，这些河道十分清楚地向我们展示出许多地方都曾遭受侵蚀，火星表面显然曾经存在过水，甚至是大湖和海洋，只是目前看起来它们存在的时间很短，而且估计距今也有大约40亿年了。

火星的表面就因为这样而呈现给我们各种极有趣又多变化的相貌。所有行星中，火星的表面是除了地球之外最适宜用望远镜观测的，它呈现在我们眼前的那一片红色背景，使人联想到荒漠的原野；红色背景上那些大块的蓝绿色——一开始叫作“海”，并一直延续到现在，正如月亮上的海一样，尽管这两种“海”到现在已经没有人认为它们再有水了。连接这些海的是一些较狭窄的暗纹，就是“运河”，这旧有的名字也随着“海”一同延续下来。

火星的四季

早期对火星的观测认为，冰雪覆盖着火星极冠区，但是最近的多数观测结果认为，即使火星有大气层，也比地球大气层稀薄得多，主要由95.3%的二氧化碳加上2.7%的氮气、1.6%的氩气、大约0.15%的微量氧气以及0.03%的水蒸气组成。通过最细致的观测发现，火星大气层中的云基本不会遮蔽上面的景物，水蒸气含量极低。既然大气层中水蒸气凝结才会产生降雪，那么火星的两极区域不可能存在大的降雪量。即使火星极区可能下雪，并且融化掉的雪很少，积雪大概也只有几厘米深。

火星表面的平均大气压强只有大约780克，连地球上的1%都不到，但会随着高度的变化而变化，在盆地的最深处可高达980克，而在奥林匹斯山的顶端却只有180克。尽管如此，它也足以支持掀起偶尔席卷火星数十天之久的飓风和大风暴。火星稀薄的大气层也能制造温室效应，只是这种温室效应仅能将其表面温度提高5℃，这比我们所知道的金星

和地球的表面温度低了许多。

1976年，“海盗号”（Viking）探测器接近火星，它的观测让我们发现，覆盖在火星两极的物质主要是干冰，而不是积雪，火星表面存在水的猜想也因此被否定（科学家们现在相信，干冰层的下面可能有冰水层）。那么火星的四季又是如何形成的呢？当火星的半球上，春季渐渐过去时，白色的极冠随之逐渐减缩，这一半球的黑暗地方会更明显，绿色也更重；而当夏季慢慢过去，白色极冠完全或差不多完全化去时，这些黑暗地方就很显然地衰败并变成褐色。早期有人认为，这种气候的变迁是来自植物：植物在火星的春季开始变得茂盛，而秋季来临时就死去。当然，这种说法现在已被证明是错误的，那究竟是什么原因形成了火星上的气候变迁现象呢？

科学家们开始把研究的重点集中到火星表面的土壤上，火星表层土壤或许由粉红色的类似长石的矿物构成，又或许由一种地球上没有的矿物构成。有人推测，火星表层土壤由一种性质与塑料相似的低价碳氧化合物构成。美国普林斯顿大学的地质学家迪特·哈格雷夫斯认为，火星的表层土壤由绿高岭石构成。千百万年前，火星上的岩浆岩与火星上一度存在的山相互作用，形成了一层绿高岭石外壳。当时不断有大量陨石穿过薄薄的二氧化碳大气层，落在火星表面。陨石落下时的巨大冲击产生了足够的热量，使火星表面某些区域的绿高岭石转变为红色的磁性矿物，而随后落下的陨石又将这些红色的磁性矿物击碎为细小的红色尘土，它们随风四散，分布到整个火星表面，从而使火星呈红色的外观。

火星的卫星

1877年，霍尔（Hall）在海军天文台（Naval Observatory）发现了火星的两颗卫星。这是两颗异常渺小的卫星，因而在以前的观测中未曾见过它们。也可能是因为没有人会想过有如此微小的卫星，所以也就没有人花费精力利用大型望远镜去细心寻觅。可是一旦找到后，才发现它们并不像想象中那样难找。当然，即便找到它们是容易的事，能否更好地观测它们还是要看火星在轨道中的位置以及相对地球的方位。只有在火星接近冲位的时候，才可以看到这两颗卫星，每次的时间依情形不同，大约有三到四个月，甚至六个月。火星在近日点附近的冲位时，用

直径不到30厘米的望远镜就能看见它们；到底可以用多小的望远镜，取决于观测者的技术以及对火星刺眼光线所做的防护程度。一般而言，基本的配置是一架直径30厘米至45厘米的望远镜。观测这两颗卫星的难点在于火星耀眼的光辉，如果这个问题得以解决，那么再小一些的望远镜也能达成观测目的。由于火星的这种光辉，外层的那颗卫星更容易被看见，尽管内层的卫星更明亮。

霍尔把外层的卫星称为“火卫二”（Deimos），内层的卫星则称为“火卫一”（Phobos），它们得名于古希腊神话中战神的两位侍从。火卫一有一个明显的特点，它与火星之间的距离从火星表面算起只有6000千米，是太阳系中所有卫星与其主星的距离中最短的；它绕火星旋转一周只需7小时39分，比火星绕轴自转一周时间的1/3还少。因此，相对火星来说，离火星最近的“月亮”是西升东落。

火卫二的公转周期是30小时18分，这种快速运动导致它在一起一落之间要经过差不多两天的时间。

如前所说，火卫一距离火星表面只有6000千米，如果我们未来的火星移民中有业余天文学家，那火卫一一定是他们最感兴趣的观测对象。

从大小方面来说，这两颗卫星是除了可能还有的部分微弱小行星外，我们在太阳系中看得见的最小的天体。由光度学推测的结果，我们知道火卫二的直径是8千米，火卫一的直径是16千米，我们见到的它们的大小，就好比从纽约用望远镜看波士顿空中悬着的一个苹果一样。

这两颗卫星的最大用处在于协助天文学家研究火星的准确质量，最终证明了其质量只有地球质量的1/9，我们将在后面讲述行星质量的章节中向大家介绍火星质量是如何得出的。

小行星群

在行星距离都已被准确测定后，太阳系中火星和木星轨道之间存在的所谓的空隙自然就引起了天文学家的注意。当波德发表他的定律时，

这个问题备受瞩目。是这空隙真的原本就存在，还是因为填补这空隙的行星渺小到没有引起我们的注意呢？

意大利天文学家朱塞普·皮亚齐（Giuseppe Piazzi）为这个问题找出了答案。皮亚齐是一个热心的天文观测者，他在西西里岛（Sicily）的巴勒莫（Palermo）有一座小天文台，他用望远镜确定了恒星的位置，并为所有他确定的恒星编制了目录。1801年1月1日，皮亚齐开创了天文观测的新纪元，在原来没有发现过任何天体的地方发现了一颗星，这颗星很快就被证明是天文学家一直在寻觅的行星，这颗星被命名为“谷神星”（Ceres）。

这个发现之所以轰动一时，是因为谷神星非常渺小；当知道了它的轨道后，又证实了其偏心率很大。很快又发现了新的天体，在这颗新行星被发现后还未完成一个公转周期时，奥伯斯（Olbers）在相同区域又发现了另一颗运行中的大行星。奥伯斯是不来梅的一位医生，常利用闲暇时间做天文观测及研究。因为相继发现的是两颗小行星而不是巨大的行星，所以奥伯斯提出了他的观点，认为这也许是一颗大行星破碎后的碎片。如果真是这样，那么可能还存在很多类似的行星等着人们去发现。这个猜测的后半部分得到了证实，在接下来的三年中，又发现了两颗这样的小行星，总数达到四颗。

就这样大约过了40年，1845年，德国观测者亨克（Henke）发现了第五颗小行星，第二年发现了第六颗。之后便开始了一系列神奇的发现，每年都会有新的发现，现在发现的小行星已经超过2万颗了。

寻找小行星

观测者们寻找小行星的兴致不减，一直延续到1890年。他们专注于这项观测，刻意寻觅和捕捉，如同猎人捕猎一般。也可以这样说，他们会布置陷阱，把黄道附近某一片星空的分布图画出来，把星星的位置记清楚，然后再去守候那些闯入者，一旦有了入网者——即一颗新行星——“猎人”就会将它收入囊中。

1890年，摄影技术成为找到这些小行星更容易也更有效的一种方法。天文学家把望远镜对准天空，开动定时装置，用较长的曝光时间为

星星拍照，曝光时间大约是半小时左右。如果是恒星，在底片上呈现的就是小圆点；而假如碰巧行星也在其中，那么就一定会运动，它的影像会是一条短线，而不是圆点。天文学家不用再长时间对着天空进行搜索，只需要拍摄照片，再从照片上一一寻找就好。这样就轻松多了，因为行星有长长的拖尾，立刻就能被认出。海德堡（Heidelberg）的马克斯·沃尔夫（Max Wolf）用这个方法发现了500多颗小行星。

大部分新近发现的小行星都非常暗弱，并且数量的增加似乎也随着暗弱的程度不断增长。按通常的推测，在我们望远镜所及的范围内大约有1万颗小行星。这些小行星实在太小，稍微大一点的小行星也只能在平常望远镜中呈现出星星似的点子，它们的圆面就更不容易被看出了，即使是用上最有力的工具也很难。谷神星算其中最大的小行星，直径有770千米。其他约有12颗小行星直径超过160千米，最小的小行星只能利用光度学粗略推算，直径大概在32千米到48千米的范围内。

小行星的轨道

有些小行星的运行轨道的偏心率非常大，例如希达尔戈星（Hidalgo），其轨道偏心率是0.65，也就是说，当它处于近日点时，它和太阳的距离要比它到太阳的平均距离近2/3；而在远日点时，它和太阳的距离要比它到太阳的平均距离远2/3，它到太阳的最远距离几乎是土星到太阳的距离。

另一个值得关注、也容易注意到的是，一些小行星的轨道倾斜度非常大，有的倾斜度超过了20°，例如希达尔戈星，其轨道的倾斜度高达43°。

之前认为这些小行星是行星爆炸之后产生的碎片的见解，目前已知是不正确的，不再作为参考。小行星的轨道占领着很宽的边界，分布范围广，如果这些小行星以前是一个整体，那么它们不会变成现在的样子。依据现在的哲学理论可知，这些天体从存在之初就是现在我们看到的样子。另外，依据星云假说理论来看，所有行星都是曾经围绕太阳运行的环状星云的组成部分。环中的物质渐渐聚集到环中密度最大的质点周围，从而形成了行星。也许小行星带没有以这样的方式聚集到一起，

而是分散成了这些不计其数的碎片。

按照钱柏林（Chamberlin）和莫尔顿（Moulton）提出的星子假说（planetesimal hypothesis）认为，这些小行星由比大行星小一些的行星相互撞击而形成。“半成品说”理论则认为，大约46亿年前太阳系形成初期，太阳系是由一段星云凝聚而成的天体。凝聚的过程中有一部分形成了大行星，另一部分没能形成，而是分散在火星轨道和木星轨道之间，构成了小行星带。

轨道的分群

这些小行星的运行轨道有一个特点，或许通过这个特点，我们可以推测小行星的起源。我已经在前面讲述过，行星的运行轨道是近似于圆形的椭圆，但并不以太阳为中心。想象一下我们从无限高的地方向下看太阳系，设想小行星的轨道如同精细绘制的圆圈，这些圆圈将相互交织在一起，如同一个错综复杂的网络，构成一个宽阔的圆环，这个圆环的外圈直径大约比内圈直径大一倍。

如果这些圆圈能够如金属线圈一般被拿起来，将它们以太阳为中心放置，而不改变其大小，那些大圆圈的直径要比小圆圈的直径长一倍，所以这些圆圈占据的地方会非常宽，就像图4–4中表现出来的那样。令人惊异的是，这些轨道在空间中的分布并不是均匀的，而是有十分明显的分群，虽然图4–4中已经能够看出来，但为了更清楚地表现分群的情况，我们在图4–5中采用了不同的表示方法：每颗行星绕着太阳公转一周都在一定日期内，行星距离太阳越远，公转周期越长。由于轨道的全圆周是129.6万秒（360度），用这个数字除以行星的公转周期，得出的就是该行星平均每天运行的角度。这个角度又叫作这颗行星的“平均运动”（mean motion）。小行星的平均运动在300至1100秒之间，有时甚至会超过1100秒，度数越大，公转周期越短，小行星与太阳之间的距离也就越近。

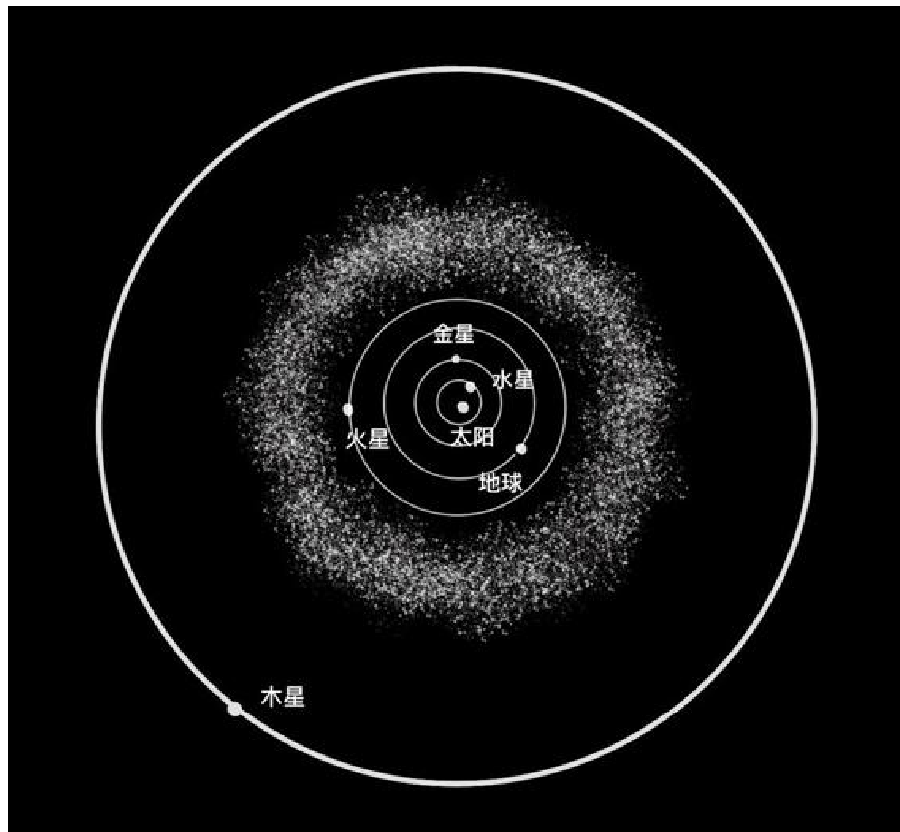


图4–4 主小行星带（白色部分）

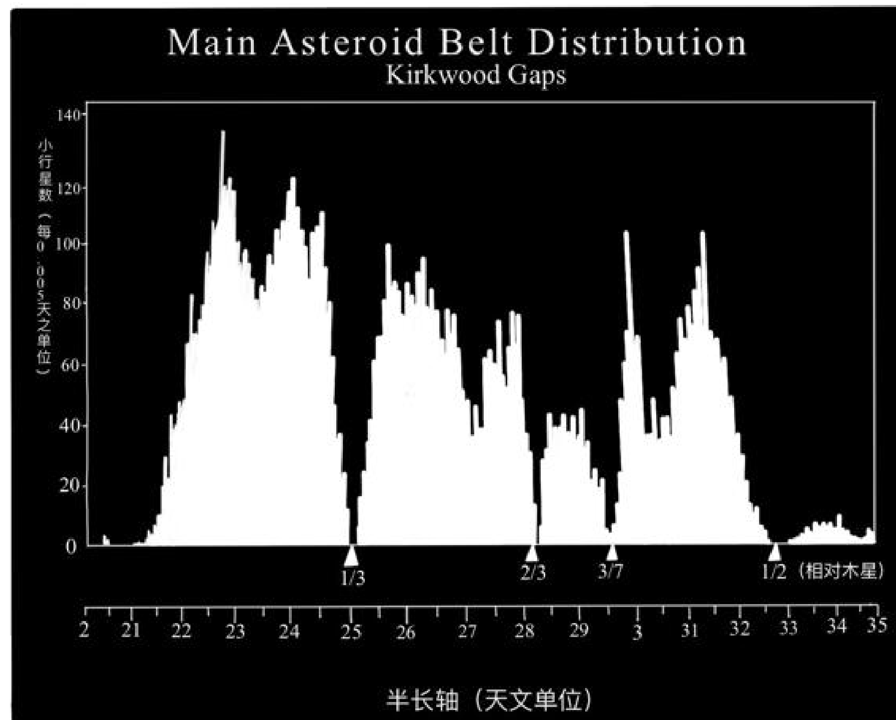


图4–5 小行星带轨道分布

现在我们来画一条水平线，然后标注出平均运动的数值，从300秒一直到1200秒，中间以100秒等分，在两个刻度之间，有多少个行星的平均运动值在这个区间就标出多少个小点。仔细观察图4–5，就能够分出五到六个群，最外层小行星的平均运动值在400秒到460秒之间，距离木星比较近，公转周期差不多需要八年的时间。接下来直到560秒是一道很宽的间隔，在540秒到580秒之间有10颗小星星。从这个点开始，越靠近木星，小行星的数量就越多，但在700秒、750秒以及900秒附近的小行星非常少，甚至完全没有。这就是奇怪的地方：在这些空隙处，小行星运动只与木星运动相关。如果一颗小行星的平均运动是900秒，那么它绕着太阳旋转一周的时间是木星公转一周时间的1/3；如果平均运动是600秒，绕太阳旋转一周的时间是木星公转一周时间的1/2；750秒的话，则是2/5。根据天体力学定律，如果一颗行星的轨道与其他行星存在上述简单关系，那么就会因为两者之间的相互作用而在运行时间上发生巨大的变化。因此，第一个发现并指出这些空隙的柯克伍德（Kirkwood）认为，这些空隙之所以会产生，是因为处于空隙中的行星

运行轨道无法保持原样。不过令人诧异的是，通约数是木星的2/3或者相等的地方，不仅不存在空隙，反而有成群的小行星。其中的原因还没有找到，有人通过统计解释，认为当通约数是1/4、2/7、1/3、2/5、3/7、1/2时，这些地方与小行星的径向分布概率的零点相符。

爱神星

我们要单独介绍这些小行星中的一颗非常特殊、引起我们特别关注的小行星，1898年之前已经知道的几百颗小行星，都在火星轨道和木星轨道之间的区域运行。但是在1898年的夏天，柏林的维特（Witt）发现了一颗小行星在近日点时竟然进入了火星轨道内部，事实上它已在地球轨道2200万千米以内了。维特将这颗小行星命名为爱神星（Eros），爱神星的轨道偏心率非常大，以至于远日点时它已远远在火星轨道之外。而且这颗小行星的轨道和火星的轨道像锁链一样相互交织，假如用丝线模拟两者的轨道，两根丝线是套接在一起的。

由于爱神星轨道的倾斜，它似乎游离到了黄道的界限之外。当爱神星与地球距离最近时，如1900年，它居然移动到了很远的北方，使得它在北纬中部时一直在地平线之上，而经过子午圈时还在天顶的北边。爱神星这种运动的特殊性，也是它未被很快发现的原因之一。从1900年到1901年的冬天，爱神星距离地球最近，我们曾经仔细地研究这颗小行星，发现它的光度一直在变化。经过观测发现，这种光度变化是有规律的，变化的周期是5小时15分。也有人提出，这颗行星其实由两颗行星组成，两者相互围绕转动；但还有一种说法是，这颗行星表面可分为光明区和黑暗区，它的光度变化是由朝向地球的半球表面上明区和暗区的面积对比造成的。2000年时，小行星探测器NEAR靠近爱神星附近,在传回地球的照片上，我们找到了答案——爱神星的亮度变化表明它是一个表面凹凸不平的柱体，这个柱体的体积大约是40×14×14＝8040立方千米。

有人猜测，爱神星的光亮变化或许是由其自转引起的，也一直有人认为是因为爱神星旁边有另外的小行星，但至今仍没有确切的答案。

从科学的层面来看，爱神星也非常有趣，因为它一次次离地球那样

近，能够准确地测量出它到地球的距离，由此还可以测量出它到太阳的距离和整个太阳系的规模。遗憾的是，爱神星每次回到距离地球最近位置的时间间隔太长了。

1900年，爱神星和地球之间的距离大约是4800万千米；1931年1月30日，爱神星和地球的距离仅仅是2600万千米，这已经比其他行星与地球的距离更近了，而它还可以缩短320万千米。

近地小行星

在已经发现的众多小行星中，有1400多颗小行星的轨道可能与地球轨道相交，这些小行星被称为近地小行星。在这些行星中，目前已知直径大于1千米的大约有500多颗，它们中的任何一颗小行星一旦与地球相撞，便会给人类带来毁灭性的灾难。

那么近地小行星撞击地球的概率有多大呢？据说平均几千万年会出现一次造成人类灭绝灾难的撞击；平均几十万年出现一次危及全世界四分之一人口的撞击；平均100年出现一次大爆炸，如1908年发生的通古斯大爆炸，爆炸的威力相当于同时引爆几百颗广岛原子弹。幸运的是月球和木星都在保护着地球，它们的运行阻止了许多小行星靠近地球。

我们需要针对小行星的运行做一些防范工作，比如建立空间监测搜索网，寻找尚未发现的近地小行星，测量小行星的运行轨道等。

1985年，中国科学院国家天文台正式开始实施施密特CCD小行星计划，通过设在河北省兴隆观测基地的60/90厘米的施密特望远镜进行小行星巡天观测；1995年，美国GPL和美国空军联合进行的“近地小行星追踪计划”，运用了美国空军在夏威夷毛伊岛建立的电子光学深空监测站；1996年3月26日，罗马成立了“太空防卫基金会”，这是一个由优秀的天文学家共同组成的组织，他们在近地小行星领域有着杰出的表现。这个基金会在全球范围内建造了望远镜观测系统，系统地搜索和观测近地小行星和彗星。

美国国家航空航天局主要研究小行星的本质，他们投入了大量精力观测小行星是纯铁的多，还是石铁混合在一起的多，然后采取相应的措

施，只要发现直径是10千米左右的小天体有可能会与地球相撞，并且运行轨道逐渐降低，就可以采取措施，启动太阳能帆板或者大型火箭发动机，人为改变小行星的运行轨道，让近地小行星沿着其他轨道运行，从而避免撞击地球的情况发生。

木星及其卫星

木星是太阳系中最大的行星，是除了太阳之外的又一“巨人行星”，它的外形和质量是其他所有行星的合体的三倍多。尽管如此，它还是不能与太阳系的中心天体相提并论，因为即使是木星这样的庞然大物，它的质量也不及太阳质量的千分之一。

木星冲日大约每一年比前一年推迟一个月，也就是每13个月发生一次。由于木星的颜色和光彩，接近冲日时在夜晚很容易就能被辨认出来。这个时候，它是天空中除了金星之外最亮的类似恒星的天体，虽然有时火星也比它亮，但它和火星有明显的区别，不会混淆，因为木星是白色的。即便使用小型望远镜观察木星，甚至是用比较好的普通望远镜观察，都很容易发现它不是一个亮点，而是一颗非常大的星球。我们还发现在圆面上有两道暗弱的带状条纹穿过，这是在300年前惠更斯就注意到的东西，并且将它画在了纸上。如果用倍数更高的望远镜观察，将会发现这些带状物是一些云状物，像云彩一样变化多端，每个月，甚至每一夜都有不同的形状。如果坚持每天夜晚都认真观察木星的情况，就会发现木星自转一周的时间大约是9小时55分钟，因此，天文学家可以在一个夜晚观察到木星的整个轮廓。需要说明的是，我们现在观察到的木星表面的斑纹与20年前观察到的有了一定的区别，因为苏梅克–列维9号（Shoemaker-Levy 9）彗星曾经进入木星的范围中，而且受到木星的吸引，在1994年7月与木星相撞，这一次的重大撞击改变了木星表面原来的样子。

观测者用望远镜观察木星时，木星表现出的两个特点会立刻引起细心的观测者的注意。其中一个特点是，木星圆面的光度并不均匀，中心比较明亮，接近边缘的地方逐渐暗淡。弱边远处的光度并不耀眼，而是

扩散开来。在这一点上，木星的情况与火星及月亮呈现出的外观形成了鲜明的对比。圆面边缘处的暗弱通常被认为是受到环绕着行星的大气的影响。

木星的另一个特点是，它并不是规则的圆形，和地球一样，其两极处比较扁平，而且扁平的程度比地球更大。即便是最细心的观测者，如果从另一个行星上观测地球，也几乎无法发现地球与正圆球体的差异。由于目前的自转速度非常快，导致赤道部分凸出来，造成了木星的显著的扁率。

木星的表面

从望远镜中观察，木星的形态和我们在大气中所见的云彩一样变化多端。木星上通常有细长的云层，其形成的原因和我们大气中云层的成因明显一样，是由于空气的流动。这些云中经常可以见到白色的圆点，而云的颜色有时呈淡红色，尤其是赤道附近的云。在赤道南北两边的中纬度区域，云是最暗也最明显的。正是由于这样，这两处的云在小型望远镜中观测时呈现的是两条黑色的带状。

木星的外观在每个方面都几乎与火星或金星有着较大的差别，其中最明显的一点就是木星完全没有恒久不变的特征。火星的地图可以绘制出来，并经过一代又一代的观测验证其准确性。但木星因为没有恒久不变的特征，就不可能绘制出地图之类可参考的东西。

尽管木星表面缺乏稳定性，但还是有一些特征是持续了许多年没有改变的，其中最引人注意的就是于1878年出现于木星南半球中纬度的红色大斑点，天文学家将其命名为“大红斑”。这个巨大的斑点在鼎盛时期的长度大约为2.5万千米，宽度约为1.2万千米，能够容纳两个地球，很容易就可以被观测到。经过10年后，大红斑开始逐渐消失，有时似乎完全消失了，但一段时间后又重新明亮起来。这种变化始终存在，持续至今，或许还会延续到遥远的未来。有人认为，大红斑出现的地方是一个高压区，那里的云层顶端与周围地区相比要高得多。200多年前，天文学家发现在大红斑的下方还有一块白色的大斑点，到现在仍然能被清晰地观测到。

木星的构成

对于木星的构成，到现在我们还说不清楚，也没有一种假说可以对所有事实进行解释。

木星最主要的特点，也是最能引起我们注意的特色，就在于它的密度很小，木星的直径大约是地球直径的11倍，因此木星的体积大约是地球体积的1300倍以上，但它的质量仅是地球的300多倍。由此可知，木星的密度一定比地球的密度小。事实上，木星的密度也的确只比水的密度大1/3而已。通过简单的计算，我们可以得出木星的表面重力是地球表面重力的二至三倍。在引力的作用下，我们假设木星的内部是高度压缩的，因此它的密度也比较大。假如木星表面与地球表面相似，也是由固体物质或液体物质构成的，那么上述情况将会比较可靠，通过事实推测，木星的外层成分应该是气状物质。

我们不仅可以通过木星变幻莫测的外貌推测出它外面包围着一层大气，还可以根据它的自转规律进行判断。我们发现，木星和太阳有一个共同之处，木星赤道部分的自转周期要短于北纬中部的自转周期，尽管木星绕的圈子更长一些。赤道部分的自转周期要比中纬度地区的自转时间短约5分钟，也就是说，赤道部分自转一周的时间是9小时50分钟，中纬度地区的自转周期则需要9小时55分钟。这表明两部分的速度之差大约是每小时320千米。如果木星表面是由液体物质或固体物质构成，那么绝不会出现这种情况。这个推测已经被“伽利略”号木星探测器（Galileo）证实，伽利略号和苏梅克–列维9号彗星几乎同时接近木星。

木星的主要成分是氢，大约占90%，剩余的10%由氦及少量的甲烷、水、氨等构成，这与原始太阳系星云的主要成分十分相似。“伽利略”号木星探测器只探测到云层下面150千米的地方，因而对木星内部结构的认识非常有限。目前我们推测，木星有一个固体的内核，质量相当于10到15个地球的质量，其密度可能类似于地球或其他固体行星的密度。内核由大部分行星物质聚集而成，以液态金属氢的形式存在。液态金属氢的组成物质是离子化的质子与电子，与太阳的内部结构相似，但温度会低很多。木星内部压强大约是4000亿帕斯卡。

木星的卫星

当伽利略第一次把他的小望远镜对准木星时，他欣喜而惊讶地发现，有四颗很小的星星伴随着木星。经过无数个夜晚的仔细观测，他发现这四颗星星都围绕着中心天体公转，就如行星绕着太阳（值得注意的是，太阳中心说理论在当时并未完全被认同）运行一样。伽利略发现的这种与太阳系极其相似的结构，有力地支持了哥白尼的日心说理论。

只要通过普通的天文望远镜，甚至是玩具望远镜就能观测到这些小天体，还有人宣称曾经肉眼就成功地观测到了它们。如果木星不存在的话，那四颗小天体就像其他小行星一样明亮，确实可以通过肉眼观测到，但由于木星的光辉太强了，所以肉眼观测到这四颗木星卫星是十分困难的。

尽管木星的四颗卫星都有名字：Io（木卫一）、Europa（木卫二）、Ganymede（木卫三）和Callisto（木卫四），但我们仍然习惯依照它们与木星的距离远近来称呼它们。与我们所熟悉的月球相比，木卫二要小一些，而木卫一则稍大些。木卫三和木卫四的直径大约是5100千米，比月亮的直径大50%左右。木卫三是太阳系中最大的卫星，比水星还要大。不过，由于它们和太阳的距离大约是月球到太阳的距离的五倍，所以四颗卫星聚集起来照在木星上的亮度还不及月球照到地球上亮度的1/3。与月球总是一个面对着地球一样，木星的四颗卫星也是永远以相同的一面对着木星，换言之，它们的自转周期与公转周期相等。

1892年之前，在人们的认知中，木星只有四颗卫星，直到巴纳德在利克天文台找到了第五颗卫星。与前面四颗相比，这颗卫星与木星的距离更近，也更加暗淡。木卫五绕着木星公转一周的时间不到12小时，这是除了火星内层卫星外已知的最短公转周期，但比木星的自转周期还是要长一点。在原来的四颗卫星中，木卫一与木星间的距离最近，它绕木星公转一周的时间是1天又18.5小时，而最外层的一颗卫星环绕木星一周则差不多需要17天。

木星的第六颗和第七颗卫星是佩林（Perrine）分别于1904年和1905年在利克天文台发现的，它们与木星的平均距离都超过了1100千

米，环绕木星公转一周的时间大约是8个多月。紧接着，又发现另外两颗，木星就共有九颗卫星了。1908年，梅洛特（Melotte）在格林尼治天文台发现了木卫八；1914年，尼克尔森（Nicholson）在利克天文台发现了木卫九。这两颗卫星与木星的距离在2400万千米到3200万千米之间，它们绕木星公转的周期都超过了两年。在太阳系中，它们与主星的距离是最远的，并且它们还有一点与太阳系大部分成员的不同之处，就是它们都是自东向西旋转的。

现代天文观测技术的发展，让我们发现了越来越多的木星卫星，截至2018年2月，天文学家们通过各种方式发现了木星的79颗卫星。

木星的卫星中，外层四颗卫星的轨道偏心率都比内层的要大一些。这些卫星都非常小，直径大约只有160千米，甚至还要小很多，因此要用大型望远镜才能观测到。有些人推测，外层卫星与内层卫星的来源是不同的。多数天文学家认为，外层卫星可能是被木星的巨大引力吸引而来的小行星和彗星，类似于苏梅克–列维9号那样的情况。

这四颗明亮的卫星在环绕木星运行时，经常会出现许多很有趣的现象，我们可以通过小型望远镜观测到。这就是卫星的"蚀"和"凌"。当然，与其他不透明体一样，木星也会投下影子。卫星在环绕木星运行经过木星的一边时，一定会从木星形成的阴影中经过（有时候，木卫四和大多数距离远的卫星会是例外）。当一颗卫星进入阴影后会逐渐暗淡，最后完全从视线中消失。

同样的道理，当卫星经过木星正面这一段时会慢慢穿过木星的视圆面。一般的规律是，当一颗卫星刚进入木星的视圆面时，它看起来会比木星更亮，这是由于木星的边缘比较暗。可是当卫星接近视圆面中央时，看起来就没有背景中的木星亮了。当然，出现这一现象并非是由于卫星亮度的变化，仅仅是由于木星的中心区域比边缘更明亮。关于这一点，我们在上文已经提到过了。

卫星的影子也非常有趣，在这种情形下，常常可以在木星上见到卫星投射的影子，看起来就像一个黑点在卫星旁边一道经过。

在天文星历中，木星卫星的各种现象（包括卫星以及它们影子的"凌

星”）都有记载，因此观测者可以很清楚地知晓何时能观测到“星食”（stellar eclipse）或“凌星”（transit）。

在最早发现的四颗卫星中，最内层卫星的食不到两天就会发生一次。根据这种现象发生的时间，一个在地球上未知区域内的观测者可借此来判定当地的经度。首先，他需要通过某种简单的天文观测方法，判断自己的手表与当地时间的误差，天文学家和航海家都很熟悉这种方法。然后，他把自己观测到的卫星凌木（或者是食）的准确时刻与天文星历中记载的格林尼治标准时间相比较。按照我们在本书第一章中的“时间和经度的关系”一章中所讲述的方法，以这一差异为凭据就可以得出当地的经度了。

不过，这种方法的精准度并不高。这种观测方法大约会产生1分钟的误差，或者说在赤道上的误差约为24千米。

木星的光环

木星光环的发现是一个意外，当“旅行者1号”探测器（Voyager 1）在航行了10亿千米之后，两位科学家一再坚持要求顺便观察木星是否有光环存在，于是意外地发现了木星光环。后来，通过地面上的望远镜也观测到了木星的光环。木星的光环很暗淡（反照率为0.05），它由许多颗粒状的岩石材料构成。在大气层和磁场的作用力下，木星光环中存在的粒子很不稳定。如果木星光环想要保持形状，就需要不断地补充粒子。光环内部的两颗小卫星——木卫十六和木卫十七显然是光环原料的最佳补给站。

土星及其系统

在所有行星中，土星在大小和质量两方面仅仅居木星之后。土星围绕太阳的公转周期是29.5年。当这颗行星可以被观测到时，观测者很容易就能将它认出来，原因有二， 一是由于它的淡红色光芒，二则是因为它的光是固定的，而不是像周围的恒星一样闪烁。

尽管土星远不如木星明亮，但土星巨大的光环使其成为太阳系中最绚丽的行星。哪怕其他行星也拥有光环，但土星光环的美丽和巨大仍然是天空中独一无二的存在。这也是早期用望远镜进行观测的观测者曾经认为土星的光环是一个谜的原因。伽利略一开始看土星光环时，感觉它们好像是土星的两个把手，但过了一两年后他却渐渐看不到它们了。我们现在知道，之所以会出现这种情形，是因为土星在轨道上运行时，这些光环的侧面恰好对着地球，又因为土星光环很薄，在伽利略使用的不够完备的望远镜中无法看到它。“把手”的突然消失给这位伟大的科学家造成了很大的困惑，据说他很担心自己在这项观测中产生了什么幻觉而一度停止了对土星的观测。后来伽利略年事渐高，就将继续观测的工作交给了其他人。不久，土星的这两个“把手”自然又出现了，可还是无法知晓它们到底是什么。直到40多年后，天文学家兼物理学家惠更斯才把这个谜团解开，他宣布了自己的结论，说明土星四周围绕着一圈很薄的环形平面，与土星本身没有直接接触，并与黄道倾斜。

土星的物理结构

土星和木星是相邻的两颗行星，因此土星的物理构成与木星有很多相似之处。这两颗行星的密度都很小，而土星的密度甚至比水的密度还小；它们的自转速度都很快，土星自转一周需要的时间大约是10小时14分钟，比木星自转一周的时间略长一点；与木星类似，土星的表面也好像由云状物变换而成，但很暗淡，因此无法看清楚。

我们在前文已经说过的关于木星密度小的原因，同样可以应用在土星上。土星同样也有一个体积较小但质量较大的中心核，周围覆盖着厚厚的大气，而我们看到的仅仅是大气的外层而已。

土星光环的各种变化

1666年，巴黎天文台（Paris Observatory）正式建立，这是法国路易十四时期的一个科学部门。天文学家卡西尼就是在这里观测到土星光环的环缝，发现光环实际分为两道，一道在外面，另一道在里面，但都位于同一平面。与此同时，另一位天文学家恩克（Encke）发现，外层光环也存在一道缝。这些环缝以发现者的名字命名，“恩克环

缝”（Encke gap）没有“卡西尼环缝”（Cassini division）那么清晰，仅仅是一道暗影而已。

为了清楚表示土星光环的各种变化状态，我们先画一幅光环垂直状态（这在现实中是无法观测到的现象）的图。在图4–6中，我们首先会注意到的是卡西尼环缝，它把光环分为外环和内环，外环较窄。在外环上看到的是模糊的灰白色恩克环缝，它没有卡西尼环缝清晰，也更难看清。内环在内侧边缘渐渐暗淡，内侧灰白色的边界叫作土星暗环。土星暗环是哈佛天文台的邦德首先提出来的，长期以来，这个部分都被认为是独立的一道光环，但认真观测会发现事实并不是这样。这道土星暗环连接着外侧的环，而外侧的环也只是渐渐飘移到这道环上。

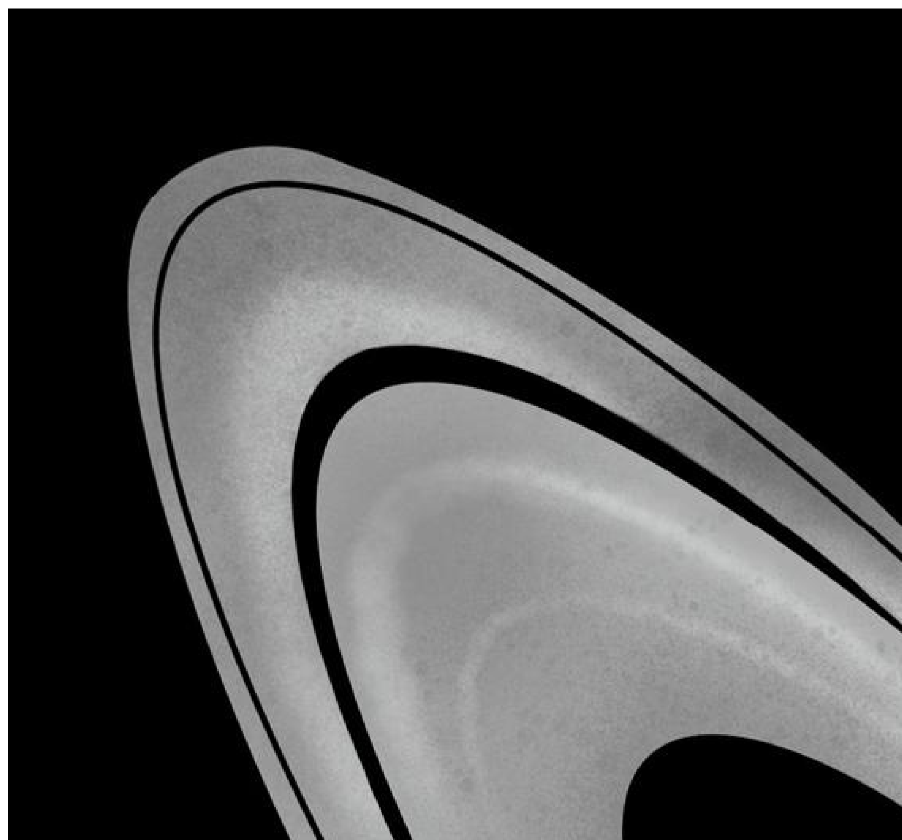


图4–6 土星的光环

土星光环与土星的轨道平面倾斜角大约为27°，但在土星绕着太阳公转的过程中，土星光环与土星在太空中保持着相同的方向。我们用图4–

7展示这种情况的效果，图中是土星环绕太阳轨道的透视图。当土星在A点时，光环的北面（上方）被太阳光照射。7年之后，当土星在B点时，土星光环与太阳侧面相对。经过B点以后，光环的南面（下方）被太阳光照射，偏斜角增加至土星到达C点的最大值，大约是27°。此后，光环相对太阳的偏斜角逐渐缩小。当土星运动到了D点时，光环的边缘再次对着太阳。当土星从D点运动到A点再运动到B点，太阳光就重新回归北方了。

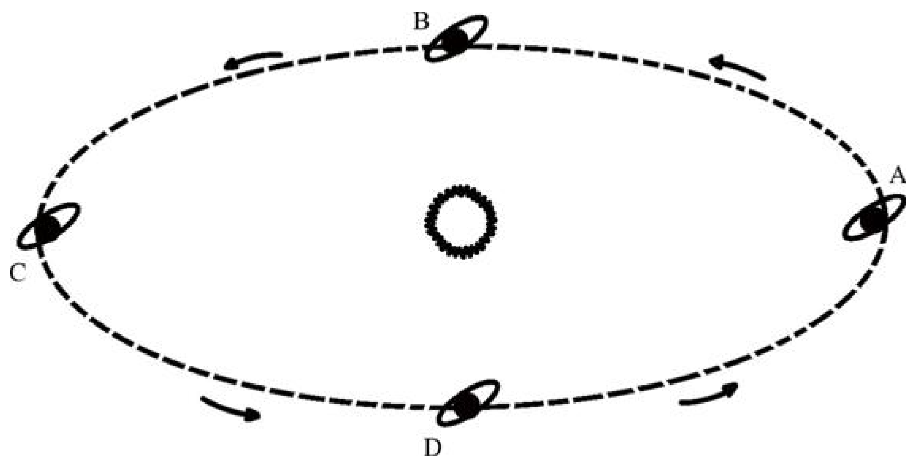


图4–7 土星环绕太阳轨道透视图

与土星比起来，地球和太阳之间的距离就太近了，让我们在地球上观测土星光环时几乎与在太阳上观察的效果相似。我们会在连续15年的时间里一直看到土星光环的北面，其中第7年光环的角度最大。此后年复一年，角度会越来越小，土星光环也逐渐以侧面对着地球，最后成了跨越土星的一道线，或者说土星光环消失不见了。随后，土星光环会再渐渐展开，光环的南面对着地球，再过15年后消失。如此往复，30年为一周期。

当我们对土星光环的形状有了了解之后，就能很容易明白它们留给我们的印象。在我们看来，这些土星光环的角度永远是偏斜的，但偏斜的角度不会超出27°。对于观测者而言，光环偏斜角越大，越利于清楚和便利地观测，而且也是观察环缝与暗环的最佳时机。土星在土星光环上的暗影是一道深色的缺口，土星光环在土星上的暗影与内环的边相同，是一道穿过土星的暗线。

光环的本质

当我们公认天体运动也遵循在地球上研究所得到的牛顿力学定律时，土星光环又在我们面前摆出了难题：这些光环的位置为什么不会发生变化呢？是什么让土星不向内环移动，从而破坏整个美丽的结构呢？虽然没有找到这两个问题的答案，但观测者经过相应的数据研究已知土星光环一定不是像看起来那样连成一片的。由于土星巨大的吸引力作用，土星光环是没办法连在一起的，而是由微小的物体云集在一起构成的，或许是很小的卫星，或许只是像砾石和灰尘一样的微粒，或许是一片烟雾。这种见解尽管已经得到了认可，但在很长一段时间内却缺乏直接的观测证据。直至基勒（Keeler）通过分光仪观测研究土星，才发现土星光环的光分散成光谱之后，暗光谱线会有一些移动。这表明，土星光环的各部分环绕土星旋转的角速度是不同的，最外侧的角速度旋转得最慢，越往里角速度越快，最里侧的角速度最大，而每个点的速度与该点卫星的运行速度相同。由此我们可以判定，土星光环是由无数非常小的碎片组成的。但是，对于土星以及其他类木行星的光环的来源，我们还是不清楚。尽管这些行星可能在形成时就有光环，但是光环系统很不稳定，光环在运行过程中可能一直在变化，也可能是比较大的卫星的碎片。

土星的卫星

除了拥有光环之外，土星也有众多的卫星（截至2019年的统计，已经发现了82颗土星卫星）。土星的卫星大小不同，它们与土星的距离也是远近不同的。在这些卫星中，一颗名为泰坦（即土卫六，Titan）的卫星通过小型望远镜就可以被观测到，而最小的卫星则需要用大型的望远镜才能被观测到。

惠更斯在对土星光环的本质进行观测研究时，无意间发现了泰坦。在惠更斯的通信文集公开后，大家还知道了关于这个发现的另一个故事：根据当时的学术习惯，这位天文学家为了确保自己研究发现的优先权，所以把这个发现隐藏在一条由字母组成的谜语里，这条由字母组成的谜语隐晦地告诉读者，土星的伴侣绕着土星旋转一周的时间不会超过15天。惠更斯将这个谜语给英国的著名天文学家沃利斯（Wallis）送了

一份。沃利斯在回信给惠根斯时，除了对他表示感谢外，还附赠了一条新的比惠更斯的谜语有更多字母的谜语，告诉惠更斯这是自己想对他说的话。当惠更斯向沃利斯解释了自己的谜语之后，沃利斯也向他说明了回赠谜语的答案，这个答案令惠更斯无比惊讶，因为沃利斯所揭示的正是与他相同的发现，仅仅是用词不同，内容更长些罢了。后来惠更斯才知道，沃利斯很快就明白了他的谜语，之所以自创了一条答案相同的新谜语，只是为了警示他，靠谜语这类文字游戏隐藏结论毫无意义。

需要注意的是，近年来，科学家们对泰坦越来越重视，因为这颗卫星的周围有一个很重要的大气层。在卫星表面，大气压强超过了15万帕斯卡，高出地球压强50%。泰坦的大气层主要由分子氮组成，这一点跟地球的大气层相似，另外还有6%的氩气和一些甲烷。十分有趣的是，大气层组成部分中还有微量的其他有机化合物，如乙烷、氢氰酸、二氧化碳等。土卫六大气层上部被太阳光破坏，看起来就像城市上空的烟雾，只是更厚一些。在许多方面，这跟地球上开始出现生命时的早期条件很像。

1655年，惠更斯在宣布发现土星卫星泰坦之时就高兴地认为太阳系至此完整了。当时发现了七颗大的行星和七颗小的行星，两者的数字神奇般地一致，正符合了欧洲文化中的一种魔数。但是，在随后的30年里，卡西尼就打破了这个神奇的系统，他接连发现了四颗土星的卫星。此后，又经历了100年，伟大的赫歇尔再次发现两颗卫星。1848年，邦德在哈佛天文台发现第八颗；1898年，皮克林（Pickering）发现了第九颗……

下面这张表格是土星九颗卫星的列表，其中包括了它们与土星的距离（以千米为单位）、公转周期以及发现者的姓名：

编号	名称	发现者	发现年份	与土星的距离（千米）	公转周期（天）
土卫一	Mimas	赫歇尔	1789	186000	0.94
土卫二	Enceledus	赫歇尔	1789	238000	1.37
土卫三	Tethys	卡西尼	1684	295000	1.89
土卫四	Dione	卡西尼	1684	377000	2.74
土卫五	Rhea	卡西尼	1672	527000	4.52
土卫六	Titan	惠更斯	1655	1222000	15.95
土卫七	Hyperion	邦德	1848	1481000	21.28
土卫八	Iapetus	卡西尼	1671	3561000	79.33
土卫九	Phoebe	皮克林	1898	12952000	-550.48

表4–2 土星的卫星

表中最值得注意的是这些卫星的距离相差非常大，并且较内层四颗卫星的公转周期间存在一种和谐的关系，这是引潮力造成的。内层的五颗卫星仿佛形成了一个集团，这个集团与相邻集团间有一个巨大的空隙，距离超过内层五颗卫星的总宽度；此后才是另外两颗卫星组成的集团——泰坦与海伯利安（土卫七）；接着又是一个比海伯利安到土星的距离还要宽的大间隙；此后是伊阿珀托斯（土卫八），最后才是福柏（土卫九），差不多又远了四倍。

土星卫星的公转周期之间存在着有趣的关系，土卫三的公转周期恰好是土卫一公转周期的两倍，而土卫四的公转周期又大约是土卫二公转周期的两倍，此外，泰坦公转周期的四倍与海伯利安公转周期的三倍几乎相等。

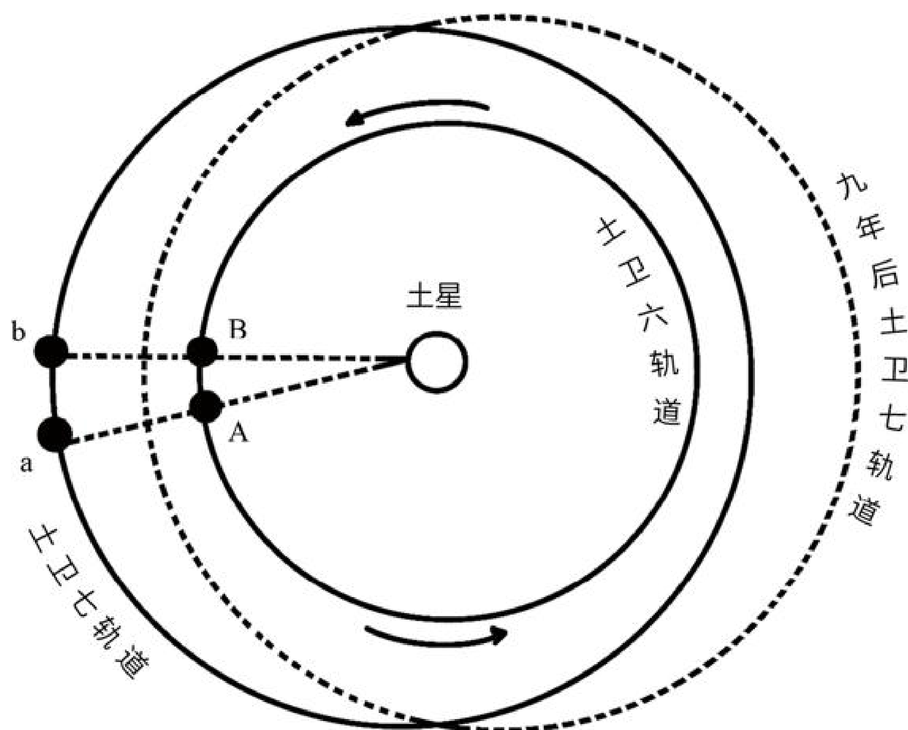


图4–8 土卫六和土卫七的轨道及其关系

最后提到两颗卫星之间的关系缘于二者引力奇特的相互作用，为了表明这一点，我们将它们的轨道图绘制出来。通过图4–8可以看出，靠外的海伯利安的轨道偏心率非常大。假设两颗卫星在某一时刻在一条直线上相合，内侧较大的泰坦位于A点，位于外层的海伯利安在a点上。经过65天后，泰坦环绕土星转了四周，而海伯利安绕着土星转了三周，于是它们再次相合，虽然距离上次相合的地方很近，但没有重合在一起。这个时候，泰坦将到达B点，而海伯利安将到达b点。第三次相合的地方便在直线Bb上，以此类推，相合点会一直向上移动。其实，两次相合之间的差距比我们在图上画出的更小。经过19年的时间，这些相合点会慢慢遍布整个圆周，泰坦和海伯利安再次相合在Aa线上。

这些相合点绕着圆周慢慢移动产生的影响就是海伯利安的轨道，或者更准确地说是其轨道的长轴也随着这些相合点做圆周运动，因此相合永远出现在两个轨道相距最远的地方，图4–8中的虚线说明了海伯利安的轨道在九年内的变化情况。

这种作用在整个太阳系中是独一无二的，不过，对于土卫一与土卫三、土卫二与土卫四来说，应该也存在相似的交互作用。

构成土星光环与卫星的物质之间的相互吸引还有一个更加引人关注的特点，除了最外面的两颗卫星外，这些物体全部都在同一平面内。如果没有阻碍的话，太阳的引力在几千年后会将这些物体的轨道分散到不同的轨道上，却与土星轨道平面仍保持相同的倾斜度。但是由于它们相互间的引力，这些轨道平面都保持在一起，仿佛都紧紧依附着土星一样。另外需要注意的是，最外层卫星绕着土星公转的方向是自东向西转，和木星最外层的两颗卫星相同。

天王星及其卫星

按距离太阳的远近算，天王星在大行星中位列第七。我们通常认为，只有通过望远镜才能观测到天王星，但事实上，一个目光敏锐的人无须借助任何工具就能看见天王星，只要他能够准确地知道天王星在什么地方，以便不被其他恒星混淆和干扰。

1781年，威廉·赫歇尔发现了天王星。一开始，他认为这只是一颗彗星的核，但仔细研究了它的运行轨迹后，他明白事实并非如此，很快他就高兴地确认自己为太阳系添加了一个新成员。威廉·赫歇尔为了感谢他的皇家赞助人英王乔治三世（George III），提议把这颗行星命名为Georgian Sidus，英国和天文学界使用这个名字长达70年。但是，欧洲的许多天文学家提出，按惯例以发现者的名字命名更合适，因此又常常将这颗行星称为“赫歇尔”。“天王星”这个名字最开始由波德提出，一直在德国使用，1850年之后为大众认可，成为通用名称。

当观测这颗行星的运行轨道时，人们开始追溯它从前所经过的路程，大家才知道约在100多年前，它就已经被观测并记录下来了，就像前几年一样。在1690至1715年间，英国的弗兰斯蒂德（Flamsteed）在为恒星编制目录表时，曾将天王星视为恒星，并记录了5次。更让人惊奇的是，巴黎天文台的勒莫尼耶（Lemonnier）在1768年12月及1769年

1月的两个月中，对它进行了8次记录。不过，勒莫尼耶从来没有注意到自己的这个观测，直到赫歇尔宣布发现了新行星时，他才知道这一项至高荣誉在自己手中握了10年，自己却与之擦身而过。

天王星绕太阳公转一周的时间大约是84年，因此，在一年之内它在天空的位置并没有改变多少。天王星到地球的距离大约是土星到地球距离的两倍。在天文学领域，这个距离是19.2天文单位[2]，如果转换成我们熟悉的计算长度，则是287,100万千米。因为天王星与地球的距离遥远，所以我们很难准确观测它的表面特征。通过使用大型望远镜观测，我们只能看到它是一个带有淡绿色的灰白圆面。

大多数行星的自转轴几乎与黄道面垂直，但天王星的自转轴却几乎与黄道面平行。与其他气态行星相似，天王星也有光环，这些光环如木星的光环那样暗弱，但又像土星的光环一样，是由约10米直径大小的物质和更加细微的尘土组成的。在所有大行星中，天王星的光环是第二个被发现的，这一发现有着十分重要的意义，它令我们了解了光环是行星的普遍特征，而非土星所特有。

天王星的卫星

目前，已经发现的围绕天王星旋转的卫星共有27颗，其中比较明显的四颗可以用普通的天文望远镜观测到。按照距离天王星由近到远的次序，这四颗卫星的名字分别是：阿里尔（Ariel）、昂布里特（Umbriel）、提坦亚（Titania）、奥伯伦（Oberon）。这些卫星与天王星的距离，从30.9万千米到94.3万千米不等。

这些卫星都有着特别的历史。除了两颗较明亮的卫星外，赫歇尔在1800年前认为他不止一次瞥见了另外四颗，因此50多年前，人们一度确信天王星有六颗卫星，因为赫歇尔使用的是当时最优质的望远镜。

1845年，英国的拉塞尔（Lassell）着手制造反射望远镜，制造了两架巨大的望远镜，一架口径为61厘米，另一架口径为122厘米。为了能在地中海晴朗的天空下进行观测，拉塞尔把较大的一架运到了马耳他岛（Malta）上。在那里，拉塞尔和他的助手对天王星进行了很仔细的观测，最终判定赫歇尔假定的另外几颗卫星是不存在的。另一方面，他们

也观测到了两颗新的卫星，与天王星的距离非常近，这是在以前的观测中未曾发现的。在随后的20年间，即便用当时欧洲最好的望远镜能再找到这两颗新发现的卫星，一些天文学家仍然对2颗卫星的存在表示怀疑。但是1873年冬季，刚刚建成的华盛顿海军天文台用口径66厘米的望远镜再次发现了这两颗卫星，二者的运动轨迹和拉塞尔的观测结果一致。

两颗卫星最引人注目的特点，就是它们的运动轨道几乎与天王星的运行轨道相互垂直。这种情况导致天王星的轨道上有两个相对的点，当天王星在这两个点上时看到的是卫星轨道的侧面。当天王星靠近其中一点时，我们站在地球上可以观测到那些卫星仿佛自南而北又自上而下地在行星两端跳跃，如同钟摆的摆锤一样。接下来，天王星逐渐向前运动，轨道也慢慢随之展开。20年后，我们可以观测到的卫星运动轨道和天王星的运行轨道又是垂直的了。那时候，它们的轨道看起来几乎变成了圆形，随着行星的向前运动，会渐渐收缩成一条直线。

海王星及其卫星

按目前所知的行星离太阳由近到远的顺序，海王星是太阳系中最外面的行星，在天王星之后。海王星与天王星在大小和质量方面都很相似，但海王星距离太阳更远，为30天文单位，远远超过了天王星的19.2天文单位，这也使海王星比天王星更暗弱，更难以被观测到。尽管用肉眼是绝对无法观测到海王星的，但只要观测者能够从天空中密布的众多亮度相似的恒星中分辨出海王星，就可以通过一架中型望远镜观测到它。

观测海王星的圆面，需要用到最好的大型望远镜才能看得更清楚。海王星看起来呈蓝色或者铅灰色，明显有别于天王星的海绿色。因为还不能观测到海王星圆面上有什么东西，所以直接观测也看不出它绕着主轴的自转情况。通过分光仪的观测，海王星自转一周的时间大约是15.8小时。

1846年，海王星的发现是数学界和物理学界举世瞩目的伟大事件之一。海王星对天王星施加的引力向人们证明了它的存在，但当时并没有任何其他证据。这个发现还有一段奇特的历史，我们需要简单叙述一下。

海王星的发现史

19世纪初期，巴黎著名的数理天文学家布瓦尔（Bouvard）计划绘制木星、土星、天王星（当时以为是最外层的大行星）的运行图。他根据拉普拉斯（Laplacian）的算法得知，这三颗行星由于相互间的引力作用，运行轨道产生了一定的误差。他绘制出来的图与观测到的木星和土星的运动完全符合，但多次努力始终无法与观测到的天王星位置相符。如果他只参考赫歇尔的观测结果，还勉强符合，但却与费兰斯蒂德和勒莫尼耶早前的观测结果完全不符，天王星在这两位学者的时代被认定为恒星。因此布瓦尔摒弃了以前那些观测的旧结果，将轨道按照新的观测做好排列之后，向公众发布了自己绘制的运行图。不过，人们很快就发现天王星开始移动并再次逃离了预测的轨道。因此，天文学家都惊奇地认为这里面必有故事，并开始思索其中的缘由。

这种情况一直延续到1845年，巴黎一位年轻的数理天文学家勒维耶因一个偶发的灵感推测，产生的误差可能是由于天王星受到一颗未知行星的吸引造成的。于是，他开始着手计算影响天王星的这颗未知行星，推测这颗行星会沿什么样的轨道运行，才会导致天王星产生轨道误差。1846年的夏天，他把自己计算得到的结果上交到了法国科学院。

在勒维耶开始他的计算工作之前，英国剑桥大学有一个叫亚当斯（Adams）的学生也产生了类似想法，并且进行了相似的工作。亚当斯将计算结果提交给英国天文学会的时间早于勒维耶，他们都计算出了未知行星所在的位置，因此如果要将这颗行星从众多恒星中分辨出来，只需要在特定的区域寻找新行星就可以了。然而不幸的是，当时天文学会的艾里（Airy）对这件事持怀疑态度，并且认为耗费时间去寻找未知行星，成功的概率太低。等到勒维耶的预测结果出来后，艾里才重新重视这件事情，而这两份报告的计算结果非常相似，这一点得到了广泛关注。

寻找新行星的任务从这个时候已经开始，剑桥大学的查利斯（Challis）对那一区域进行了仔细观测。我需要对此做特别说明，在没有计算机，没有光谱分析仪，没有优良的摄像设备的年代，通过简陋的工具在遍布天空的众多恒星的包围中辨别一颗微小的行星绝非易事，首先要无数次确定尽可能多的星星的位置，然后认真观察，才能确定其中一颗星星的位置是否发生了变化。

查利斯正在进行这项工作时，勒维耶给柏林天文台的伽勒写了一封信，告诉了他自己推测出的未知行星在恒星中的位置。恰好那时候柏林天文学家刚刚绘制出一幅部分天空的星图，这颗行星就在这幅图所描绘的天空中。因此，收到勒维耶的来信后，天文学家开始用望远镜观察星图，想确定通过望远镜是否能够观测到无法直接在星图中看见的天体。让人欣喜的是，天文学家很快就发现了这个天体，将它的位置与周围的恒星进行对比后，发现它在缓慢地移动。不过，伽勒本着严谨的科学态度，想在第二天晚上再次观测以证实自己的发现是否正确。第二天晚上，伽勒发现那颗星星又移动了一些，至此不再有任何疑问。于是，伽勒给勒维耶回信，确认了这颗新行星存在的事实。

这则新闻传到英国后，查利斯对照检查了自己的观测，才发现这颗行星曾经两次出现在他的观测视野中，但遗憾的是，他并没有对自己的观测结果进行对比研究，因而在柏林传出消息后，才知道自己错失良机。勒维耶和亚当斯被天文学术界授予发现海王星的荣誉。

海王星的卫星

全世界的天文学家都把注意力投入对这颗新发现的行星的观测中。不久之后，威廉·拉塞尔（William　Lassell）发现海王星的一颗卫星，卫星的直径大约是2700千米。

这颗卫星与海王星之间的距离大约是35.5万千米，几乎等于月球到地球的距离，但是它绕海王星公转一周的时间仅仅是5天21小时，这表明海王星的质量比地球的质量大17倍。

这颗卫星从东向西转动，运动轨道近似于圆形，与海王星轨道之间的倾斜角是20°。在约600年内，这颗卫星轨道的倾斜角不会发生变化，

但会向着东方移动一周。这种退行是由海王星赤道部分隆起造成的。我们借助退行速度能够计算出海王星赤道部分隆起的大小，但这个量非常小，通过望远镜观测海王星的圆面是无法发现的。

海王星也有光环，但与天王星和木星相似，它的光环非常暗弱。尽管人们还不清楚它的组成结构，但为了便于记忆，人们为海王星的光环进行了命名。最外层的光环叫亚当斯，它由三段明显的圆弧组成，这三段圆弧的名字分别是自由（Liberty）、平等（Equality）和互助（Fraternity），再就是没有名字的包含着伽拉忒亚卫星（即海卫六，Galatea）的圆弧，然后是勒维耶（Leverrier）的圆弧，最后是内层非常暗淡但十分宽阔的伽勒（Galle）。

曾经的大行星冥王星[3]

尽管在数学和物理学的帮助下，天文学家们发现了海王星，但天王星不怎么规律的运动令海王星的引力无法让天王星沿着它现有的轨道运行，受其影响，海王星的运动也没有规律。

虽然通过理论计算出来的轨道与实际观测到的轨道之间存在的差异已经非常小，以致许多天文学家认为不会再存在未知行星。如果真的存在未知行星，那么寻找和观测到它将是一件十分困难的事情。这是因为，一来未知行星的引力造成天王星和海王星的运动误差太小，二来新行星在望远镜中一定是模糊不清、暗淡不明的小天体。

亚利桑那州弗拉格斯塔夫洛厄尔天文台的创建人洛厄尔一直试图找到这个问题的答案，他计算出了可能存在未知行星的运行轨道，然后和天文台的其他天文学家一起，通过望远镜来寻找可能存在的神秘行星。他们使用的是拍照的方法，首先将一片存在位置信息的天空拍摄下来，几天之后，再在同一区域拍摄一些照片，然后与之前拍摄的照片进行认真对比，观察是否存在改变了位置的天体。假如出现了位置发生变化的天体，就说明这是行星而不是恒星，而且极有可能就是正在寻找的未知行星。

遗憾的是，洛厄尔于1916年逝世。虽然对新行星的观测研究还处于未知阶段，但天文学家们始终没有放弃搜索的工作。在此过程中，尽管也曾有过许多次胜利的欢呼，不过都被一次次失望取代，因为观测者在观测中多次误将运行在火星和木星之间的许多小行星看作那颗神秘的行星。观测者们在搜索过程中不止一次发现，拍摄的照片中存在许多移动的天体，但后来都被一一证实是小行星而不是他们想要寻找的行星。直到1930年1月，天文学家再次从拍摄的照片中发现了一颗移动的天体，它的移动速度很慢，据此推测，它到太阳的距离应该比海王星还远。这个在双子座附近出现的神秘天体会不会是天文学家在寻找的行星，又或者是让天文学家白白高兴一场的其他小行星呢？这个问题的答案仍然只能依靠时间来给出。于是，在接下来的一段时间内，许多人开始关注这个远在千万里之外的天体，发现它的运行速度始终没有加快！新行星诞生了！1930年3月11日，克莱德·汤博（Clyde Tombaugh）宣布发现了新行星。

在接下来的工作中，天文学家们开始在以往拍摄到的照片中寻找更多关于新行星的信息。他们找到了许多照片，时间甚至可以追溯到1919年。这些有价值的发现为计算行星的运动轨道提供了有利条件：新行星绕太阳公转一周的时间，大约是249年；它与太阳之间的平均距离是地球到太阳距离的39.6倍。

这颗新行星通常出现在海王星的外面，它们之间的平均距离是14亿千米。不过新行星的运行轨道是一个扁平的椭圆，曲率比其他大行星的都要大，而且与海王星的运行轨道相交。那么，新的问题出现了：这两颗行星会不会撞在一起？通过计算，可以得出新行星的轨道倾斜得非常厉害，尽管有时候它到太阳的距离比海王星还近，但新行星与海王星之间的最小距离是3.66亿千米，所以绝对不会相撞。

新行星被命名为“冥王星”（Pluto），这个名字有两层含义：第一，这个名字前两个字母PL是珀西瓦尔·洛厄尔（Percival Lowell）的姓名缩写，洛厄尔创建了亚利桑那州弗拉格斯塔夫的洛厄尔天文台，而这颗行星就是在那里被发现的；第二，命名的人认为冥王是更外层的黑暗世界的主宰，原来指的是阴曹地府的王，但那里并不一定十分黑暗。或者另外一位天文学家提出命名为“海后星”的建议更加合适，寓意海王的妻

子。“冥王”这个名字也许可以留给更加遥远的行星，但命名仅是小事一件，对现实并没有什么改变。

不过，冥王星的整体情况是怎样的呢？在观测中发现，冥王星的大小和质量类似于地球，而不像相邻的那些巨大行星，只有通过大型望远镜才能够观测到它。它是一个黄色球体，同时也是人类的太空飞行器还没有拜访过的行星（2006年1月19日，美国国家航空航天局的空间探测器“新视野号”发射升空，主要任务是探索冥王星和柯伊伯带，并已经于2015年7月14日飞掠冥王星）。我们现在还不清楚冥王星的表面情况及其大气详情，冥王星的结构可能与海卫一相似，由70%的岩石和30%的冰水混合而成，地表面的光亮部分覆盖着一些固体，带有少量固体甲烷、一氧化碳等物质，大气的主要成分是氮、一氧化碳、甲烷等。有一点毋庸置疑，那就是冥王星上的温度非常低，生物难以生存。如果我们站在冥王星上，太阳看起来只是一个大光点，光度是满月时的300多倍，显然那里不会是生物快乐繁衍和生活的地方。

现在，我们再来看一下与冥王星相关的最有趣的部分。通过照片发现新行星之后，天文学家开始计算它的运行轨道和体积大小，结果表明，冥王星非常小。那么它的存在是否会如洛厄尔猜想的那样，对天王星的运动造成影响呢？普通人只能猜测，但准确的计算结果会给我们一个明确的答案。这项工作的负责人是耶鲁大学的布朗教授，他是这方面的权威专家，他的研究给出了确定答案。他发现冥王星带给天王星的影响非常小，小到无法通过洛厄尔提出的由它对天王星的影响而推断出它的存在。这样一来，洛厄尔的计算就只有理论意义而没有实际功能了。洛厄尔的最大功劳是用自己的财产创建了一座天文台，这座天文台的贡献是对普通天体进行摄影研究，还为寻找新行星刻意拍摄了许多照片。在洛厄尔逝世之后，天文学家才发现了冥王星。

尽管冥王星的发现过程看起来像是一个传奇故事，但冥王星仅保持了70余年大行星的地位。2006年8月24日，天文学家们在第26届国际天文学联合会上，经过投票推翻了冥王星是大行星的结论。这样一来，太阳系中的九大行星变成了八大行星。不过，即便人们否认了冥王星的大行星地位，它的运行轨道和运行方式却是无法否认的。

太阳系的比例尺

测量天上距离的方法，类似于工程师测量难以到达的高度（比如山峰）的方法：选取能够实际测量的A点和B点作为基准，然后去测量无法到达的C点。首先，测量出A点的角度，然后测量出B点的角度，因为三角形的内角和是180°，所以减去A点和B点的角度之和，得出的就是C点的角度。我们发现，C角是与基线相对应的，正是站在C点的观测者所看见的A、B两点的夹角，这个夹角被称为“视差”（parallax），这就是从A点看C点与从B点看C点在方向上的差距。只要是对初等几何有所了解的人，都知道利用三角形知识很容易计算出C点（我们想要测量的遥远天体）相对A、B两点（地球上两个位置已知的点）的距离。

我们将这种测量方法进行仔细而深入的研究后会发现，对于基线AB而言，随着物体距离的拉大，视角会变得越来越小，到了一定的距离之外，视差将会变得小到难以用肉眼观察。假如需要测量离我们很远的天体，即使将测量基准定义为赤道直径，依然发现BC线和AC线的方向看起来基本相同。通过视差方法测量距离有两点需要注意：第一，基线的长度；第二，测量角度的准确程度。

在所有天体中，月球到地球的距离是最近的，因此视差也最大。如果我们将地球赤道半径作为基线，那么角度差不多是1°，所以对月球距离的测量会相当准确。在公元二三世纪时，托勒密就已经使用这种方法测量出了基本准确的月球到地球的距离。不过，如果想要测量太阳或者行星的视差，还是需要依靠精密的仪器。

在测量时，我们可以选择地球上的任意两点作为基线的两端，如格林尼治和好望角这两个地方的天文台。正如我们在前文说过的，当金星凌日发生时，地球上各个地方的天文观测机构都发布了金星凌日的出现时间和完成时间相对于它们所在位置的方向，借助这些数据就能够测量出金星或者太阳的准确距离，人们将通过视差测量距离的方法称为“三角测量法”（triangulation）。

为了测量出太阳系的大小，我们只要知道某个时刻任意一颗行星相对于我们的距离。尽管在历代天文学家的共同努力下，人们已经用图画将所有行星的运行轨道和运动状况描绘出来了，这是一幅相当准确的图画，类似于某个国家的地图，但上面缺少比例尺，因此图中两点之间的距离究竟是多少，人们并不知道。除非有了比例尺，天文学家所需要的就是这种能表示太阳系图的比例尺。

地球与太阳之间的平均距离是天文学家首先需要知道的基本单位，当然这段距离的测量方法有好几种，绝对不是只有测量视差这一种方法。在各种方法中，有些测量方法和测量视差方法的精确度相似，而这些测量方法的精确度会更高。

利用光的运动进行量度

借助于光速是所有的测量方法中最简单的一个。当地球处于公转轨道中的不同位置时，通过观测木星卫星蚀可以得知，光走过与地球和太阳之间的相等距离需要的时间大约是500秒。这种测量的另外一种方法是借助于行星的光行差。简单说就是，因为地球和光线的联合运动而导致的行星方向的细微变化，所以得出光从太阳到达地球需要的时间是498.6秒。大家都知道光的传播速度，光速乘以498.6得出的结果就是地球与太阳的距离。根据最新的数据得知，光的传播速度是299792.458千米/秒，这个数字乘以498.6的结果大约是14950万千米，也就是地球和太阳之间的距离。

其他测量方法

太阳系比例尺的第三种测定方法，是借助于太阳施加给月球的引力的量度。这种引力的一个表现是当月球绕着地球公转时，上弦期大概是平均位置后2分钟左右，望月期会慢慢赶上并超过，下弦期在平均位置前2分钟左右，等到朔月期再次落后于平均位置。这样一来，便存在一种荡动与月球绕着地球的运动相协调，而荡动的量与太阳距离成反比关系，因此只要测量出这个量，就可以知道地球与太阳的距离。

第四种测量方法依然要借助引力，只要我们能够确定太阳质量和地

球质量之间的关系就可以了。换言之，如果我们能够测量出太阳质量是地球质量的多少倍，就能推算出地球到太阳的距离是多少才能满足地球每年绕着太阳公转一周这个条件。

测量太阳距离的结果

通过上述各种方法，我们确定了太阳的“地心视差”（geocentric parallax），即通过地球中心和赤道一点看见的太阳中心，在日出时刻和日落时刻的方向变化。结果是8.8秒强。这个视差太小了，甚至肉眼无法直接看出来，但借助望远镜能够观察到。因此从太阳上观察地球，肉眼看见的是一个小光点，但通过望远镜看见的就是一个小圆盘。

当我们确定了太阳视差和赤道部分的地球半径之后，想要计算出太阳的平均距离就是一件十分简单的事情了，这一距离最可靠的数值大约是14960万千米。

如果用长度单位“千米”来表示地球和太阳之间的距离，数值会非常大，当然，这一距离实际上也不小。但如果用光速或者无线电传播速度来表示，就仅仅是8分钟多一点点，而地球和最近的恒星之间的距离要大于4光年。观测者站在最近的恒星上看见的太阳只是一颗星星，即便通过大型望远镜也无法看见地球。就算能够看见，还是要用最好的望远镜才能将太阳和地球分开。在我们看来，它们之间有着遥远的距离，但在恒星上观察，它们之间的夹角不足1角秒。

地球与太阳之间的平均距离就是我们曾提到的“天文单位”（astronomical unit），它就成了太阳系图的比例尺，我们可以以此测量其他行星的距离。此外，它还可以作为测量太阳系之外的恒星与其他天体之间的距离的基线。正是这个原因，天文学家曾经通过各种方法试图将这个距离测量得非常准确。

引力和行星的称量

我们已经对一些行星绕着太阳公转的基本情况有所了解，不过行星

运动的基本定律不是遵从轨道运行，它们的运动只是受到了万有引力的影响。根据牛顿的引力定律理论可知：宇宙中的每个质点都会受到其他质点的吸引，它们之间的吸引力和距离的平方是反比关系。爱因斯坦将这个定理进行了拓展，把质量和能量结合起来，也就是说，能量也有引力效应（通过著名的公式$E=mc^2$，可以将能量转为质量，然后计算出引力的大小）。到现在为止，人们加在物质上的任何作用都无法改变物质的引力。两个物体相互吸引的力一样大，无论它们之间存在什么障碍，或者它们之间有着多么遥远的距离，又或者它们的运动速度有多快，它们之间的引力始终是相等的。

行星之间的引力决定着它们的运动，就算只有一颗行星绕着太阳运行，它也会一直转动下去，因为太阳的引力会一直影响着它。通过数学计算可以知道，这颗行星的运行轨道是椭圆形的，太阳位于其中的一个焦点上，这颗行星会始终沿着椭圆轨道运行——开普勒在17世纪时首先观察到了这个现象（其实用的是第谷的观测资料），很久之后，牛顿通过自己的万有引力定律证实了这种情况。同理，根据定律可知，这些行星相互吸引。与太阳强大的引力相比，行星之间的引力太小了，因为太阳系中的行星质量远远小于太阳的质量，这些相互吸引导致行星慢慢偏离原来的椭圆轨道。这颗行星的运行轨道看起来像椭圆形，但不是真正的椭圆形。此外，这颗行星的运动与数学紧密相关。从牛顿时期开始，世界各地著名的数学家就对这个问题倍加关注，每一代都在研究并修补上一代的不足之处。100年之后，拉普拉斯和拉格朗日（Lagrange）进一步解释了行星椭圆轨道的位置变动情况。在几千年或者几万年，甚至是几十万年前就能预测出这些变动情况。因此，我们明白地球绕着太阳运行轨道的偏心率逐渐在缩小，这种变化大约会持续4万年的时间；此后，偏心率会逐渐增大，而在几万年之后会比现在更大。其他行星也有相同的情况，在数万年的时间中，它们的轨道形状也在往复变化。如果不是数理学家们以前的预言被一一证实，读者可能会怀疑千万年后的预言是否正确。这种准确性来源于精确地测量出每颗行星对其他行星的运动造成的影响。在我们预言这些天体的运动之前，假设它们绕着太阳公转的椭圆轨道是固定不变的，就是排除其他行星的引力之后的情况。这样一来，我们的预言会常常出现偏差，偏差程度大约是几分之一度，经过长时间后，偏差可能还会增大。

不过如果加上其他行星的引力，预言的准确性将会变得非常高，即使现在最精密的天文观测，也难以察觉其中的误差。我们在前文讲述的海王星的发现史，就是证明这种预言可靠性的最佳实例。

怎样称量行星

现在，我想跟读者描述一下数理天文学家们是怎样得出上述结果的。首先，他们需要知道某颗行星对其他行星的吸引力，与该行星的质量是正比的关系。因此，我们可以这样认为，当天文学家们想知道行星的质量时，他们需要称量一下行星。做这件事的原理类似于屠夫使用弹簧秤称量牛腿的原理。屠夫将牛腿提起来时，他会感受到地球对牛腿的拉力；当他把牛腿挂到秤钩上时，这个拉力转移到了称的弹簧上，拉力越大，弹簧的拉伸程度就越大，而标尺上的读数正是这个拉力的大小。大家知道这个拉力只是地球对牛腿的引力，但根据力的定律可知，牛腿对地球的引力等于地球对牛腿的吸引力。因此，屠夫只是去发现牛腿对地球的吸引力有多强，并且将这个吸引力称为牛腿的重量。根据这个原理，天文学家们可以通过一个物体对其他物体的吸引力，确定该物体的重量。

当我们把这个原理引申到天体中时，马上会面临一个难以解决的难题：我们不可能跑到天体上称量它们的重量，那么要怎样才能称量出天体的吸引力呢？在回答这个问题之前，我需要向读者解释物体的“质量”和“重量”的差异。物体的重量会因为所在地方的不同而不同，例如一个物体在纽约称的重量是15千克，但在格陵兰的秤上重量却是15.03千克，而在赤道地区重量又是14.97千克。之所以会出现这样的差异，是因为地球并不是一个球体，而是有一些扁，并且它一直在旋转，因此随着地域的变化，物体重量也会有所不同。如果将地球上重15千克的牛腿带到月球上去，它的重量就仅有2.5千克，因为月球引力比地球引力小得多。不过，无论是在地球上还是在月球上，始终都是同一块肉，它的多少没有发生变化。如果将这个牛腿带到火星上，重量又会发生变化；再到太阳上，又会是另一个重量（大约是400千克）。由于随着称量地方的变化，重量会有所不同，因此天文学家们不会说一颗行星的重量是多少，只会说一颗行星的质量是多少。质量指的是构成行星的“物质的

量”，无论在什么地方，质量都不会发生变化。

现在继续讨论行星。我们在前面说过，通过一个天体对另一个天体的引力，能够测量出该天体的质量。有两种方法可以测量出行星之间的引力，其中一种是测量出一颗行星施加在临近行星上的吸引力，即让它偏离独行时原有轨道的引力。测量出误差之后，便可以知道吸引力，然后计算出行星的质量。

需要提醒读者注意的是，在计算过程中，所使用的数学计算非常精确而且十分复杂。对于有卫星的行星来说，可以用更简单的方法得出结果，因为通过卫星的运动能够求出行星的吸引力。通过牛顿第一定律可以得知，在不被任何外力影响的情况下，一个运动物体会始终沿着直线做匀速运动。因此，假如有一个物体正在沿着曲线运动，我们知道一定有其他的力作用在这个物体上，而力的方向与曲线曲向的方向相同。有一个很好的例子——扔石头——可以很好地说明，如果地球没有吸引着石头，石头会始终沿着扔出去的路线运动，直到离开地球。不过，由于地球的吸引力，石头会一边前进，一边向下运动，直到落到地面上。石头扔出去时的速度越大，它走过的路程就越远。再以子弹为例，一颗子弹前半部分的路线类似于直线。我们如果在高山顶上水平地发射一枚炮弹，炮弹的速度是每秒8千米，如果它不被空气的阻力影响，那么走过的路线曲度就与地球表面相吻合。所以，这枚炮弹永远不会落在地面上，而是会绕着地球旋转，就像沿着轨道运行的小卫星一样。如果真是这样，天文学家只需要知道炮弹的速度，便可以计算出地球的吸引力。月球是地球的卫星，它绕着地球的运动如同那枚炮弹。一位在火星上的观测者可以通过测量月球轨道得出地球的吸引力，就像我们通过落在地球上的物体测量地球的吸引力一样（卫星的运行状况其实与主星的质量有关，但与自身的质量无关。推演过程大致如下：向心力大约等于引力，即$mv^2=GMm/r^2$，这里的M和m分别表示主星的质量和卫星的质量，v表示卫星绕着轴心的公转速度，r表示卫星的公转轨道半径，因此，$v^2=GM/r$，与卫星本身的质量m无关）。

于是，对于像火星或木星这样拥有卫星的行星来说，地球上的观测者可以通过行星对卫星的吸引力，计算出该行星的质量。这种计算方法简单易懂，用行星和卫星之间的距离的立方除以卫星公转周期的平方，

得出的商和行星的质量具有比例关系。这条规则可以用于绕着地球运行的月球运动和绕着太阳运行的行星运动——实际上，该规则进行拓展之后，甚至可以用于宏观世界中任何以引力导致的圆周运动。我们知道地球与太阳之间的距离大约是1.5亿千米，这个数的立方除以地球公转一周的平均时间365.25日的平方，将会得到一个商。我们将这个商称为太阳商数。如果我们用月球到地球距离的立方，除以月球公转周期的平方，将会得到另一个商，我们将这个商称为地球商数。通过计算得知，太阳商数大约是地球商数的33万倍，我们由此可以得出结论，太阳质量也是地球质量的33万倍，即33万个地球才能抵得上一个太阳。

我所说的算法是为了解释这个原理，但天文学家们的工作绝对没有这么简单。因为地球与月球之间的距离不是恒定不变的，而是会在太阳的引力下不断变化，所以我们一般说的是平均距离。因此天文学家们测量地球引力的方法，是当钟摆的周期是1秒时，测量在不同的纬度上的钟摆长度，然后通过精密的数学方法，计算出与地球有一定距离的小卫星的公转周期，最后得出地球商数。

我们在前文说过，需要借助于卫星求出其他行星的商数。幸运的是，与太阳对月亮的引力相比，其他卫星受到的引力就小多了。根据火星的外层卫星，我们计算出火星商数是太阳商数的1/3085000，因此火星质量也是太阳质量的1/3085000；此外，木星质量是太阳质量的1/1047，土星质量是太阳质量的1/3500，天王星质量是太阳质量的1/22700，海王星质量是太阳质量的1/19400。

万有引力定律是天文学家的工作基础，但这只是他们解决这个问题的基本原则，经过300多年的数学推演，这个定律才变成现在的样子。与100多年前的科学家相比，现代科学家其实很幸运，因为他们拥有计算机这个强大的计算工具。计算机技术的发展让科学家们的工作越来越方便，他们首先制定一些规则，然后再将使用规则观测到的精密数据输入到计算机中，计算机就会根据预先输入的程序进行计算，大大降低了人工计算量。不过，伟大的发现依然要依靠科学家们的准确预测和辛苦工作。

1　Lowell Observatory，位于亚利桑那州弗拉格斯塔夫。——编译

者注

2　天文单位是天文学中计量天体之间距离的单位，数值取地球与太阳之间的平均距离。——编译者注

3　原标题名为“冥王星”。——编译者注

第五章 彗星和流星

彗星

与我们截至目前所研究过的天体相比，彗星的特别之处在于其特殊的形状、巨大的轨道偏心率以及罕见性。在相当长一段时间内，彗星的结构和本质都显得那么神秘，人类对这类天体一直有着很大的兴趣。我们对可以观测到的地球附近的一颗彗星（更准确的说法是太阳附近的彗星）进行研究后发现，这颗彗星由三个部分构成，每个部分并不是各自独立、相互区别，而是彼此融为一体。

首先，我们肉眼看见的是一个星状物，这是彗星的核，又叫“彗核”（cometary nucleus）。

然后，包裹核的是一片模糊的云状物，像雾一样一直延伸到边缘，因而我们无法看清它的边界，这片云状物被称为“彗发”（coma）。“彗核”与“彗发”结合起来构成彗星的头部，看起来就好像是透过云雾闪烁的星光。

最后是从彗星延伸出来的尾部，长短不一，各种各样。小彗星的尾巴短到几乎看不见，而大彗星的尾巴在天空中延伸，能占据很大面积。彗星尾部与头部相连的地方较窄而且明亮，逐渐远离头部后会变得较宽，也会越来越分散，因此它看起来总是类似于扇形。到最末，彗尾（cometary tail）变得模糊不清，与天空连成一片，肉眼难以追踪，也就看不清楚它到底消失在了什么地方。

彗星的亮度差异非常大，虽然明亮的彗星拥有耀眼的光芒，但大部分彗星是无法凭肉眼看见的。有时候，我们看到彗星却看不见它的尾部，当然，这是极其微弱的彗星才会出现的情况。有时候，我们几乎看不见彗星的核，只能看见一小片彗发，像一片稀薄的云彩，但中间会略亮一些。

历史记录显示，100年中能够以肉眼看见的彗星为20多颗，而通过望远镜对天空进行观察时，会发现彗星的数目比我们想象中的要多得多。目前，勤奋的观测者们每年都会发现一大批彗星。显然，这个数量的彗星在很大程度上都是偶然被发现的，但同时也取决于观测者搜索的技术。有时候，同一颗彗星会同时被多位观测者观察到。这时，在已知的一次彗星出现时，第一个将这颗彗星的准确位置上报给天文台的人，即被认为是这颗彗星的发现者。

尽管这样，彗星的命名仍然需要遵守一些规则，这是因为多数彗星的出现没有规律，随机性强，就算是周期彗星也都拥有很长的周期。彗星的名字通常使用发现者的名字进行命名，然后再将公历年份加在发现者的名字之前，最后根据这一年发现彗星的次序添加拉丁字母*a*、*b*、*c*……不过，发现者也可以自己命名。

彗星的运行轨道

望远镜被发明之后，人们便发现彗星像行星一样是绕着太阳运行的。牛顿指出，彗星的运动类似于行星的运动，同样受到太阳引力的支配。这两者最大的区别是，行星的轨道近似于圆形，而彗星的轨道狭长，以至于很多情况下难以确定彗星轨道的远日点位置。想必，许多读者希望准确地知道彗星轨道的基本情况以及对其产生制约的法则，下面我们就来一一解释。

牛顿说，物体只要受到太阳引力，就会沿着圆锥曲线运动。公元前4世纪，希腊数学家密勒克姆首先提出了圆锥曲线的概念，当平面与圆锥相交时可能会产生三条曲线，这时候，如果移动的平面与圆锥的任意母线都不平行，那么所得的截线是椭圆；如果移动的平面与圆锥的一条母线平行，那么所得的截线就是抛物线；如果移动的平面与圆锥的轴平行，那么所得的截线是双曲线的一个分支（把圆锥面换成相应的二次锥面时,则可得到双曲线）。由此，我们也就知道，圆锥曲线分为椭圆、抛物线和双曲线三种，第一种是人们都很熟悉的、首尾相连的曲线，而后两种都有两个分支，可以向远方无限延伸。抛物线的两个分支在很远的地方几乎会向同一个方向伸展，但双曲线的这两个分支则永远是分开的。

当理解了这些曲线，我们就可以进行一个思维实验，假设现在地球把我们留在了其绕着太阳公转轨道的某个点上。为了打发在太空中的寂寞时光，我们模拟开枪来消磨时间，想象子弹也像小行星一样绕着太阳运行。所有发射出去的子弹，如果速度低于地球的公转速度，即小于每秒29.8千米，它们就会绕着太阳运行，而且运行轨道会比地球的公转轨道小，无论子弹朝着什么方向射出都是一样的；如果子弹的速度与地球的公转速度相同，它们的运行轨道等于地球的公转轨道，而且周期相同，所有子弹会用一年的时间绕着太阳运行一周，最后汇聚于出发点；如果子弹的速度比地球的公转速度快，即大于每秒29.8千米，它们的运行轨道要比地球的公转轨道大，随着速度的增大，公转周期也会变长。假如子弹的速度大于每秒41.8千米，它们便能摆脱太阳的引力，沿着双曲线的一端一去不复返。无论我们朝着哪个方向开枪，最终都会出现这种情况。因此，在太阳周围一定区域内有着一定的速度限制，当速度超过了这个限制时，彗星便会挣脱太阳的束缚，一去不回；如果无法超越这个限制，太阳的引力就能够把它拉回来。

与太阳的距离越近，这个速度的限制也会越大。速度的限制与到太阳距离的平方根是反比关系，所以，如果到太阳的距离是原来的四倍，那么速度限制只有原来的一半。空间中任意一点的速度限制都能很容易地计算出来。在行星沿着轨道运行时，经过这一点的速度乘以2的平方根1.414即可。

因此，假如天文学家能通过观测得出一颗彗星经过运行轨道中的某个已知点的速度，就可以推算出这颗彗星飞离太阳的距离以及它的回归周期。通过分析这颗彗星在可见期内观测到的数据，天文学家就能得出关于这个问题的更准确答案。

实际上，我们发现的所有彗星的运行速度都没有超过上述限制。需要注意的是，在观测时，有些彗星的速度稍微大于太阳引力所允许的最大速度，但超出的部分可能存在于误差范围内，有些彗星的速度非常接近限制速度，但无法弄清楚它比限制速度小还是大。因此，这些彗星的运行轨道会在太阳系的边缘地区，需要经过几百年、几千年，甚至是几万年才能回来。有些彗星的运行速度又远远小于限制速度，它们绕着太阳公转一周的时间比较短，所以叫作“周期彗星”（periodic comet）。

哈雷彗星

在所有的彗星中，第一个被发现依规则周期回归的彗星是天文学史上著名的哈雷彗星（Halley's comet）。这颗卫星于1682年8月出现，在一个月的时间内都可以被观测到。哈雷根据观测到的这颗彗星的数据，计算出了它的运行轨道。他发现，这颗彗星运行轨道的特征和开普勒在1607年观测到的那颗明亮彗星的运行轨道相同。

两颗彗星似乎恰好沿着同一个轨道运行是根本不可能的事情，于是，哈雷推断这颗彗星的运行轨道实际上是椭圆形的，运行周期大约是76年。如果事实真是如此的话，那么这颗彗星应该在过去的76年中出现过。

因此，哈雷根据这个周期向前追溯，想看看是否有关于这颗彗星的记录。1607减去76是1531，他发现1531年确实出现过一颗彗星，他认为这就是上文所说的那颗彗星。1531再减去76就是1456，1456年果然也出现了一颗彗星，而且这颗彗星的出现曾经引发了整个基督教世界的恐慌，当时的教皇加里斯都三世（Callixtus III）下令祷告，一方面祈求这颗彗星不要给国家带来灾难，另一方面也祈求能打败进攻欧洲的土耳其人，“教皇下诏制彗星”的传说极有可能就是指这件事情。

哈雷还在更古老的历史中找到了这颗彗星可能出现的记载，但由于缺乏对这颗彗星更详尽的描述，哈雷也无法确定是否是这颗彗星。不过，根据1456年、1531年、1607年和1682年这四个年份的详细记录，哈雷有充足的理由推测这颗彗星在1758年还会出现在近日点附近。克莱罗（Clairaut）是当时法国最著名的数学家之一，他计算出了木星引力和土星引力对这颗彗星的运行轨道产生的影响。他发现这种引力的影响会推迟彗星的回归，也就是说，这颗彗星在1759年的春天才能回到近日点。后来这个预言被证实了，这颗彗星果然出现，并且在1759年3月12日经过近日点。

根据预测，哈雷彗星下一次回归出现在1835年11月，1910年4月是再下一次，这次哈雷彗星的景象非常壮观：4月20日，当哈雷彗星在近日点附近经过时，我们通过肉眼就能看见它的尾巴；5月初，它在黎明

前夕的东天中呈现耀眼的光芒。彗星的尾巴经过近日点时的角度高达150°；5月19日，这颗彗星从太阳和地球之间穿过，两天后它的尾巴从地球上空掠过。由于当时它和地球之间的距离仅为2500万千米，所以有些人担心，被彗星尾巴笼罩的地球生物会死亡。事实上，彗星的尾巴非常稀薄，没有给地球带来任何不利影响。7月时，哈雷彗星已经离太阳很远了，即使通过望远镜也无法看见它。然而，它在天空中横扫而过时的景象，着实令当时的人们惊慌不安。1986年，当哈雷彗星再次回到近日点，人们又以肉眼领略了一次这颗彗星带来的奇观。哈雷彗星下一次经过近日点的时间大约是2061年。

消失不见的彗星

1770年6月，继哈雷宣布以他的名字命名彗星之后，法国天文学家莱克塞尔（Lexell）发现了一颗非常特殊的彗星。不久之后，就可以通过肉眼观测到这颗彗星了。这颗彗星的运行轨道一经证实就在天文学界掀起热议，它的轨道是椭圆形的，运行周期大约为6年。大家都对它的回归进行了充满信心的预测，但后来这颗彗星却再也没有出现过。好在人们很快就找到了其中的原因。这颗彗星在6年后回归时恰好位于太阳的另一边，所以无法看见。根据计算，当这颗彗星继续运行时会经过木星，而木星的引力导致它的运行轨道发生变化，从而超出了望远镜能够观测到的范围。这也解释了为什么以前从来没有看见过它。在莱克塞尔发现这颗彗星之前，它恰好经过木星附近，而木星改变了它原来的运行。1767年，木星的引力将这颗彗星拉到太阳附近，并使它围绕太阳公转了两周；1779年，当木星与这颗彗星再次相遇时，木星猛地推了它一把，不知道将它推到了什么地方。从那时起，天文学家发现的二三十颗彗星都有运行周期，但大部分仅仅观测到两三次而已。

在对彗星的研究中也要注意一点，它似乎不会如行星一样无限期存在，而是会如生物体般发生解散和衰亡。比拉彗星（Biela's comet）就是最奇特的一例，显然它已经完全解体了。1772年，天文学家首次观测到这颗彗星，但当时没有意识到它是周期彗星。1805年再次发现了它，但仍然没有发现它是1772年出现过的那一颗彗星。1826年，天文学家第三次观测到了它，并通过先进的方法计算出了它的运行轨道，最终确

定它就是前两次出现过的那颗彗星，并将它的公转周期测定为6.67年。按照这个测算，比拉彗星在1832年和1839年都会再出现，但这两次在地球所在的位置上都无法看见它。1845年它会再次出现，天文学家可以在11月和12月观测到它。1846年1月，当它接近太阳和地球时，天文学家发现它已经分裂成了两个部分。最初，彗星比较小的一部分非常暗弱，后来慢慢变得与另一部分的亮度相同。

1852年，比拉彗星再次回归。这时，两个部分之间的距离比之前更远了。1846年，彗星两部分之间的距离大约是32万千米，1852年则超过了160万千米。1852年9月，天文学家最后一次观测到比拉彗星，此后，尽管它还应该再回归七八次，但却再也没有观测到它。根据前面几次回归，我们很容易就可以准确地算出这颗彗星应该出现的位置，由于它没有再出现，所以我们推测这颗彗星已经完全解体。在下一节中，我们将会进一步讨论彗星的组成。

据说有两三颗彗星都是这样消失的。这些彗星都被观测到了一次或者几次公转回归，并且一次比一次暗弱，最后彻底消失不见。

恩克彗星

在所有的周期彗星中，有一颗彗星最有规律且被观察得最频繁，这就是以德国天文学家恩克名字命名的彗星——恩克彗星（Encke's comet）。恩克第一个准确测量出了恩克彗星的运行轨道。这颗彗星是1786年被发现的，但和通常的情况一样，它的运行轨道并没有被测定出来。1795年，恩克彗星被卡罗琳·赫歇尔女士（Ms. Caroline Herschel）再次观测到。在1805年和1818年，这颗彗星又被观测到两次。在最后这两次中，恩克彗星的轨道才被准确测定出来，所以在经过计算之后确定了它的周期，并且与之前的观测相符。

此时，恩克发现这颗彗星的运行周期大约是3年零110天，由于受到行星——主要是木星引力——的影响，所以存在着一定的变化。它的最近几次回归几乎都能在一些地方被观测到。

这颗彗星之所以著名，主要是由于在一定的时间内，它的运行轨道一直在减小，直到它与太阳之间的平均距离减少了40多万千米为止。根

据恩克彗星的远日距推测，它的存在时间可能长达好几千年。此外，就它的外表而言，它的彗发和彗尾都已经消失，像是一个迟暮之年的老人。

1984年4月，环绕金星旋转的空间探测器发现，当时有大量水蒸气从位于地球和金星之间的恩克彗星中冒出来，与原来的预计相比，失水的速度是原来的三倍。根据这种现象，有些人认为恩克彗星不久后就会消失。但也有人提出了不同的看法，他们认为尽管恩克彗星的视亮度一直在降低，但它的真亮度在最近100年中并未出现显著变化，而且它最近几次回归时抛出的物质也跟以前一样多，完全没有消失的迹象。

每年11月20日到23日的金牛座流星雨，就是恩克彗星送给我们的礼物。

木星捕捉彗星

1886年到1889年这段时间，发生了一件引起大家关注的事情，在太阳系中发现了一颗新彗星。1890年，日内瓦的布鲁克斯（Brooks）在纽约观测到了一颗彗星，通过计算得知，这颗彗星沿着轨道运行一周的时间大约是7年。这颗彗星的亮度很高，奇怪的是，为什么以前我们没有发现它呢？不久之后这个问题得到了回答，天文学家发现，这颗彗星在1886年经过木星附近，木星的引力让它原来的运行轨道变成了如今的新轨道。此外，还有多颗周期彗星会从木星附近经过，可能也是这样被木星捕捉带进太阳系的。

那么新的疑问又摆在我们面前，是不是所有的短周期彗星都有这种经历呢？这个问题的答案是否定的，因为哈雷彗星没有近距离经过任何行星，而恩克彗星也是一样，它经过木星时与木星轨道的距离不足以被木星的引力拉进木星所在的运行轨道，但木星的轨道比较大时可能会发生这种事情。

1994年6月，木星成功地捕获了苏梅克–列维9号彗星，并且与之有了亲密的接触，这是近几年天文学史上的重大事件之一。1933年，尤金（Eugene）、卡罗琳·苏梅克（Carolyn Shoemaker）和戴维·列维（David Levy）一起发现了这颗彗星。在这颗彗星被发现后不久，人们

就测定出了它的运行轨道靠近木星，是高度椭圆形的，并且位于将会发生碰撞的地方。

通过分析可知，1992年，苏梅克–列维9号彗星曾经与木星擦身而过，当时这颗彗星已经分裂成了至少21片碎片，这些碎片分布在其几百万千米的轨道中，原彗星和碎片的质量、体积都不确定，原彗星的直径估计在2千米到10千米之间，而最大碎片的直径在1千米到3千米之间。

1994年6月16日到22日的这段时间内，彗星碎片朝着木星大气层的外部飞奔而去，这是有史以来人们第一次见到两个天体的碰撞。这一次碰撞，出现在所有大型基地天文望远镜以及数以千计的业余小型望远镜中，若干艘宇宙飞行器，包括哈勃太空望远镜和伽利略号也都观测到了。在碰撞发生后的几个小时内，拍摄到的图片就被传到网上，并引起了ftp和www站点的网络堵塞。

彗星从哪里来

就算是最近，仍然有猜想认为，太阳系中的彗星来自恒星之间的广阔空间。现在这种观点似乎已被放弃，因为还没有证据表明彗星的速度能够超过太阳系中的速度极限。根据彗星的速度判断，它们可能来自行星的轨道之外，但绝对不是从恒星之间来的。此后，我们会发现太阳在空中不是静止不动而是运动着的。即使我们假定彗星真的来自太阳系之外，但上述事实依然表明，它们在太阳系以外时，也会随着太阳系一起运动。

根据对彗星的研究，有人提出观点，认为彗星有自己规则的运行轨道，与行星的运行轨道的不同之处是偏心率非常大。彗星的公转周期常常是几千年或者几万年，甚至是几十万年。在这个漫长的过程中，彗星会在太阳系之外很远的地方运行。如果彗星在回归到太阳系附近时恰好近距离经过一颗行星，这时可能会发生两种情况：第一种情况是，这颗彗星被行星的引力推离原来的轨道，所以加快速度朝着更远的地方飞去，甚至可能远到它再也不会回来了；第二种情况是，这颗彗星被行星的引力吸引，速度减慢，而原来的运行轨道也会缩小，所以就出现了许多周期不同的彗星。于是，我们得出结论，我们所见到的彗星都是太阳

系中的成员。还有一些人认为，这些彗星可能是很久之前的古代太阳从宇宙成云（暗星云）中经过时捕捉到的，这种说法有一定的可取性。

1950年，荷兰著名的天文学家奥尔特提出了一个假设：有一个巨大的星云团存在于太阳周围，这里是一个彗星库，里面有好几亿个小小的彗星核，它们都是固体状态的。由于受到过往恒星的引力作用，星云团中的彗星会跑到太阳系中去。根据现有资料得知，任何彗星的轨道都没有显示出该彗星是从太阳系之外来的。这个事实表明，彗星来自星际空间的说法是错误的。尽管许多天文学家都赞同奥尔特的假说，但这个假说的正确性还没有被证实。

明亮的彗星

天空中不时出现的明亮彗星会引起每一位观测者的极大兴趣，就现有的知识来说，我们很难准确地预测出何时会出现这样一颗彗星。19世纪仅出现过五六颗所谓的明亮的大彗星。其中最明亮也最引人注目的那颗彗星出现在1858年，这颗彗星以发现者意大利天文学家多纳蒂（Donati）的名字命名。这颗彗星的发现过程呈现了这颗彗星的变化情况。第一次观察到这颗彗星是在6月2日，当时这颗彗星只是像暗淡的星云一样，通过望远镜观测看起来就像是天空中的一朵小白云，不只看不见彗尾，更不知道它会变成什么样子，直到8月中旬才能慢慢找到它逐渐形成的彗尾。9月上旬，仅用肉眼就可以观测到它了。此后，这颗彗星以令人惊奇的速度增长，每晚都越长越大，越来越明亮。这颗彗星似乎在移动，但一个月内似乎都没怎么动，每夜都会飘浮在西天。10月10日夜里，它的亮度达到了顶峰。哈佛天文台的邦德将它仔细描绘成图，其中的两幅图显示了彗星的同步情况，一幅是肉眼观测到的情形，另一幅则是望远镜中观测到的。10月10日之后，这颗彗星渐渐变暗，直至慢慢消失。不久之后，它向南移动到地平线之下，不过，南半球的许多观测者一直追逐着它直到1859年3月。

在这颗彗星将要脱离人们视线时，数学家们开始计算它的运行轨道。很快，人们就发现它不是在标准的抛物线上运行的，而是在延伸到无限远处的椭圆上运行。它的运行周期大约是1900年，但可能存在上下100年的误差，因此它在上一次，也就是公元前1世纪的回归应该能够被

观测到，但却没有相关的记录可供证实。也许可以期待它的下一次回归，那将在38世纪或者39世纪。

有一个非常奇特的情况需要注意，1843年、1880年和1882年这三年中出现的彗星几乎是在同一轨道中运行的，其中第一颗彗星的记录是最有意义的一次记录，看起来它好像会从太阳的边缘擦过，实际上它却在日冕之外运行。2月底，这颗彗星有些突然地出现在太阳附近，即使白天也能被观测到。异常巧合的是，在它出现之前传出了一个预言，说1843年会是世界末日。受到这则预言的影响，人们将这颗彗星的出现视为不祥之兆。

这颗彗星在4月中消失不见，所以它的观测时间相当短。它的公转周期随后成了人们关注的焦点。我们发现，它的运行轨道与抛物线没有明显的区别。因为观测时间太短，所以对周期的各种猜测都变得有些不准确，我们只能推断，这颗彗星要在好几百年之后才会再次出现。

出乎人们意料的是，37年后，有人在南半球观测到了一颗彗星，并且发现这颗彗星几乎与前者运行在同一轨道上。首先，这颗新观测到的彗星的长尾从地平线之下慢慢冒出来，当时阿根廷、好望角和澳大利亚等地区都观测到了这个现象。直到2月4日才看到它的头部出现，扫过太阳继续向南运行，以致北半球的观测者始终都没能观测到它。

人们因此产生了一个疑问，这颗彗星与1843年出现的那颗彗星有没有可能是同一颗呢？以前，人们认为两颗彗星经过很长时间出现在同一轨道中，那它们便是同一颗彗星。然而对于这种情况而言，从前的假设与实际观测结果不符。直到1882年，这个问题才被解决，因为出现了第三颗彗星。它的运行轨道也与上面所说的两颗彗星相似，但这颗彗星绝对不是两年前出现的那颗彗星。于是，我们得出了这样的结论：在同一轨道中有三颗明亮的彗星在按照不同的周期运行。或许还不止这三颗，因为1668年和1887年也发现了两颗近距离经过太阳的彗星，只是它们的轨道与上面三颗略有不同。

我们推测这些彗星可能是一颗大彗星经过近日点时，由于受到太阳的引力而分裂成了五个部分。1882年9月，大彗星的核在经过近日点之后，再次分裂成了四个部分，这四部分的间隔时间大约是1个世纪，周

期在660年到960年之间，再次回到近日点时将是四颗毫不相关的彗星。

彗星的本质

彗星的核的组成物质看起来是冰、气体、小部分灰尘及其他固体物质。彗星的大小有着巨大差异，小的彗星就像一粒沙子，而大的彗星就像空中落下的陨石。接下来我们需要回答的问题是，彗星经过多次公转之后，它的这些组成部分是如何始终保持在一起而不散开的呢？当彗星的头部近距离经过太阳时，它的形状常常发生变化，这种情况似乎证明上述疑问或许更接近事实。

经过光谱仪的分析，表明这些彗星的光线不只反射太阳光，还具有其他特点，其中最显著的特征是三条明亮的条纹，这与碳氢化合物的光谱极为相似。这种气体能够发光，还能反映出彗星内部的光谱。

在一大半情形下，这种气体发光依靠的不是太阳的热量，而是太阳风的影响，与地球大气层中的极光是同一类气体。

似乎可以肯定的是，彗星的组成物质是不稳定的，且具有挥发性。我们通过望远镜观测明亮的彗星时，总是能发现彗星的头部有大量的蒸汽冒出，并朝着太阳的方向缓缓上升，等到离开太阳后慢慢展开，形成彗星的尾部。但彗星的尾部并不像动物拖着的尾巴，它不是彗星的组成部分，而是像烟囱中冒出来的青烟一样，由非常小的灰尘颗粒组成，从彗星的核中跑出来。

通常彗星出现时完全没有彗尾，等到逐渐靠近太阳时才开始形成。彗星和太阳之间的距离越近，彗星发出的热量就越大，尾巴的发展也越快。由于太阳辐射的作用，尾巴的组成材料会快速向外扩散，因此彗星的尾巴与太阳的方向总是相反的。

流星

不论对天文学的了解程度有多少，流星几乎是所有人都知道的，而

且它是许多诗人的赞美对象，他们感叹于它惊人的美丽，却又因为它的短暂扼腕叹息。流星的光度有着巨大差异，但越明亮的流星，数目越少。一个常常在野外露营的人，平均一年也就只能见到一次明亮的流星。如果运气够好，他会看见一颗能够将夜空照亮的流星。

在任何一个晴朗的夜晚，一位观测者在一个小时内几乎会见到三四颗以上的流星，但是有时候流星会非常多，如8月10日到15日这个时间段，流星不仅比平时多，而且更加明亮。历史上有几次流星的数目繁多到令人诧异和恐慌，其中值得特别关注的分别发生于1799年、1833年、1866至1867年。最后一次最为壮观，以致非洲南方的黑人为了纪念这件事情，竟然形成一种习俗来保持这个回忆。

流星和陨石

直到19世纪，流星的来历才渐渐为天文学家所知晓。太阳系中除了众所周知的行星、卫星和彗星之外，还有许多望远镜观测不到的小天体在围绕着太阳运行，大部分都类似于小石头，只是比沙粒大一点而已。在地球绕着太阳公转的过程中，常常与它们相遇，此时这些小天体的相对速度高达每秒几十千米，甚至是100多千米。这样高速度的天体从地球周围的稠密大气中穿过时，一定会产生巨大的摩擦力，从而产生高温，使它们自身的物质熔解发出明亮的光芒；无论组成的物质多么坚固，都会转化成一道亮光，逐渐消失在空中。我们看见的就是一颗微粒穿过上层大气的稀薄地带时燃烧殆尽的过程。

显然，流星越大就越坚固，出现时就会越明亮，燃烧的时间也越长。有时，流星太大、太过坚固，在距离地面只有几千米的地方才会彻底消失。这时候，人们在它经过时就会见到一颗非常明亮的流星。在这种情况下，当流星消失几分钟后，人们会听到类似大炮发射般的声响，这是当流星高速飞行划过大气层时压缩的空气产生的震动造成的。有时候，流星到达地面之后还没有燃烧殆尽，便形成了陨石，一年中在不同的地方总会出现几次这种情况。

流星雨

当代关于流星的最伟大发现与每年某些季节出现的流星雨概率相关，最值得关注的流星雨发生在11月中旬，这些流星雨叫作“狮子座流星群”（Leonids），因为它们都是从狮子座中分散开来向外运动的。通过历史资料我们发现，如此大规模的流星雨，大约每隔一个世纪的1/3时间会出现一次，已经这样反复发生至少1300多年了。最早的记载来自阿拉伯人的记述：

“599年，摩哈兰月（Moharren）末日，群星乱舞如蝗；人众俱惊，皆告于无上之神，若非神使将至，胡有此异象耶？愿祈福祉。”

第一次对这种规模的流星雨有详细记录的是1799年11月12日发生的流星雨，这是洪堡德（Humboldt）在安第斯山脉观察到的。他似乎认为这只是一种神奇的天象，并没有对它的起因进行严谨的科学研究。

下一次流星雨出现在1833年，天文学家奥伯斯推测流星雨的出现可能具有周期性，而且周期是34年，并预测1867年还会再次出现流星雨。后来的事实证明了这个预测。但1866年也有流星雨，这两年中，天文学家对流星雨的观测更加仔细，并获得了非凡的天文发现，揭示了流星和彗星的关系。在对此进行详细说明之前，我们要先解释一下流星雨的辐射点。

我们发现，当流星雨出现时，如果用线标出每颗流星在空中划过的轨迹，然后将这些线反方向延伸，就会发现它们相交于天空中的某一点。对于11月份的流星雨来说，这一点位于狮子座（Leo）中；而对于8月份的流星雨来说，这一点位于英仙座（Perseus）中。这一点就是流星雨的辐射点（radiant）。流星移动的路线是相同的，似乎都是从辐射点向着四面八方辐射，但不要认为在这个点上可以真正看到所有流星，它们可以位于这一点90°以内的任何地方。只要我们能够看见流星雨，那它们的路线就是从这一点出发的。这表明，流星遭遇地球大气层时，始终沿着平行线运行。辐射点就是透视法中所说的消失点（vanishing point）。

彗星和流星的关系

我们知道了11月份流星雨的出现周期是33年，还测定了它们辐射点

的准确位置，因此，计算出这些流星的运行轨道就不是难事。1866年，当流星雨出现之后，勒维耶就开始进行这项研究工作。恰好1865年12月出现了一颗彗星，它在1866年1月经过近日点，天文学家奥伯尔兹（Oppolzer）对这颗彗星的运动进行仔细研究后计算出它的轨道，并确定它的公转周期大约是33年。但奥伯尔兹没有注意到这颗彗星与流星群的出现周期非常接近。随后，斯克亚巴列里发现奥伯尔兹计算出来的彗星公转轨道和勒维耶计算出来的11月份的流星雨运行轨道十分相似。由于这两者实在太接近，有人甚至怀疑它们是一体的。很明显，制造11月份流星雨的天体在轨道上追随那颗彗星运行。因此，有些人推断，这些天体原本是彗星的组成部分，后来渐渐脱离了彗星。当彗星分散解体之后，某些未完全消失的部分会变成微小天体，继续绕着太阳运行，但会因为相互之间的吸引力不够强大而逐渐离散，不过它们依然在同一轨道中运行。

8月份的流星雨也是同样的道理，它们的运行轨道与1862年发现的彗星的运行轨道非常接近，而这颗彗星绕着太阳公转一周的时间大约是123年。

还需要引起注意的是1872年发生的类似事件，我们在前面的讲述中已经提过比拉彗星的消失过程，这颗彗星的运行轨道几乎与地球的公转轨道相交于一点，而地球经过这一点的时间是11月末。根据对这颗彗星的观测，推测它会在1872年9月1日经过这个交点，而地球还有三个月才会经过这一点。参考其他类似情况可知，1872年11月27日晚上将有流星雨出现，而辐射点位于仙女座中。后来这个预言被证实了，这些流星被称为“仙女座流星群”（Andromedids），并形成了若干次美丽的流星雨，不过1899年后只能看见很少的流星雨。

也有很多令人失望的情况，比如1866年出现的彗星，在1898年到1900年中本该再次出现，但天文学家始终没有观测到它。也许是观测时被漏掉了，并非彻底消失，因为它经过近日点时与地球之间的距离太远，以致地球上的人们无法看见它；更加奇怪的是，1899到1900年间本该出现的流星雨也并没有大批量出现，这种情况可能是由于受到了行星的吸引力作用，使这群流星的运行轨道发生了变化，这是完全有可能发生的事情。

在大多数人的认知中，无数彗星在之前绕着太阳运行的过程中，曾经将微小的碎片遗落在后面，而这些碎片只不过像掉队的队员，依然会在这个轨道中运行，等到进入地球大气层时就会形成流星雨。不过还有一个问题，是否所有的流星都是彗星的碎片，答案应该是否定的，因为有些流星的情况并不是这样，有些流星进入地球大气层的速度要高于上一节中所说的抛物线的极限，所以这些流星看起来可能只是流浪在与我们的系统没有关联的恒星界。

黄道光

这是一种柔和微弱的光，它围绕在太阳周围，一直延伸到地球轨道附近，而且恰好处于黄道平面。在任何一个晴朗的晚上，热带地区的人们在日落后的一个小时内都能够看见这种黄道光。北纬中部的最佳观测时间则是春季的夜晚，日落之后的一个半小时内，黄道光会出现在西方或者西南方，而且延伸到昴星团中。之所以这时候最容易观测到黄道光，是因为它和黄道是对称的，所以此时与地平线之间的夹角最大。秋季是日出之前可见，黄道光从东方慢慢升起，然后向南方扩展。

天空中正对太阳的地方也存在一片微弱的光，这片光的名字叫gegenschein，这个词是德语，意为“对日照”（counterglow）。由于这片光太弱，所以仅仅在最有利的条件下才能够看见它。如果这片光进入银河中，它会被淹没在银河的光辉里。

每年的6月和12月，对日照会经过银河，在这两个月中无法看见它。1月和7月的上旬，也有可能看不见。其他时候，当太阳降落之后，天空非常晴朗、月亮又没有出现时能够看见它。在那时，对日照看起来就像一片暗淡的光影，而且无法看清楚轮廓，观测者在寻找它时，扫视太阳的正对面应该就可以锁定它。

大家认为一些尘埃微粒（性质与流星相似）绕着太阳运行时会反射太阳光，从而形成了黄道光。我们也可以用相同的原因解释对日照，力学中的原理也证明，流星类物质能够在太阳的对面聚集。

第六章 恒星

星座

在对我们居住的这部分空间进行了一番考察后，我们将任想象飞往更遥远的太空，把目光转向广袤无垠的星空，感受辉耀满天的群星。

通常情况下，能被我们肉眼看见的全天恒星大约是5000多颗。实际上，其中只有一半恒星可以同时位于地平线之上，而这一半中还有许多与地平线太接近，从而被城市的灯光或者浓厚的大气遮盖住。在晴朗且没有都市光害的夜晚，肉眼能够看见的恒星数还不到2000颗。我们把肉眼可见的恒星称为“亮星”（lucid star），为的是与通过望远镜才能观测到的大批恒星进行区别。

当我们看到夜空中闪闪发光的群星时，总认为它们处于同一平面，因为看起来它们与地球之间的距离似乎都是相等的。我们在第一章中就讲过，假设群星是在一个大圆球的内部平面上，这个大圆球将地球包裹了起来。这个大圆球沿着偏斜的主轴旋转运动导致了星辰的东升西落。不过，对北纬中部的观察者来说，他们会发现绕着北极旋转的星星永远不会降落，这就是我们在前文说过的恒显圈（upper circle）；而绕着南极旋转的星星永远不会升起。这个大圆球每一恒星日自东向西旋转一周，不足4分钟旋转1度。

众所周知，由于地球沿着主轴自西向东转动，天上的景物看起来在自东向西旋转。同时，因为地球还绕着太阳公转，所以太阳看起来是在群星之中缓慢向东移动，每天大约移动1度，一年绕着黄道旋转一周。我们在前面已经讲述过地球转动产生的这种结果。

太阳慢慢向东移动，根据地球自转制定的恒星日每天比太阳日少4分钟。每夜星辰都会比上一夜早4分钟升起，同一个小时内会偏向西1度。四季轮流出现，所有的星辰都会交替从夜空中经过。

星辰在天空中并非均匀分布，而是一团一团地聚集在一起。其中一

些星辰非常醒目且引人关注，如北斗或飞马座（Pegasus）大正方形，令人印象深刻，一见难忘。古代人对天空中耀眼群星的兴趣跟我们一样，他们还为群星取了名字，宇宙的样子几千年来几乎没有什么变化，星座也就诞生了。

我们所熟悉和了解的星座是由古希腊人传下来的（其中有了一定的发展和修改），而古希腊人又是从美索不达米亚的居民那里学来的。公元前9世纪，古希腊著名的诗人荷马（Homer）就描述过大熊座、猎户座（Orion）以及其他著名的天上形象。最早描述古代星座（大约是50个）的作品是马其顿的宫廷诗人阿拉托斯（Aratus）创作的*Phenomena*，这部作品创作于公元前270年，书中详细描述了所有的星座。星座的名称以神话中的英雄、鸟兽的名字命名，每个名字又都与一些人们很熟悉的故事相关。

如今在古老的星座之间画出的，或者说创造出的这些新的星座，是对古代星座空白的填补——尤其是在南半球，因为古希腊人对此处的星空情况完全不了解。

天文学家将星座的拉丁文旧名字保留下来，但现代星图中已没有表示星座的旧式英雄、鸟兽等形象了。为了便于研究，星座成为天空中包括不同星群的区域，由我们任意定下边界。星座的边界要平行或者垂直于天球赤道，而边界之内的星星都属于这个星座。当月球、行星或太阳出现在边界里面时，也可以说它们位于星座之中。

由于月球、行星、太阳与黄道之间的距离不会太远，它们常和黄道带上的12个星座建立联系，这就是十二星座，它们的名称分别是：白羊（Aries）、金牛（Taurus）、双子（Gemini）、巨蟹（Cancer）、狮子（Leo）、室女（Virgo）、天秤（Libra）、天蝎（Scorpius）、人马（Sagittarius）、摩羯（Capricornus）、宝瓶（Aquarius）、双鱼（Pisces）。黄道带是指环绕着天球的一道宽16°的带子，黄道位于其中。将黄道平均分成12个区域，这就是我们所说的黄道十二宫。从春分点一直向东，十二宫的名字对应着上述十二星座的名字。2000年前，每一宫恰好包含对应的星座。不过，随着黄道十二宫向西缓慢移动，如今与十二星座已经无法完全相符了。

我们在这一章所讲述的内容，主要是为了让读者更好地认识北纬中部常见的星座，而且大部分星座都有着特殊的形状，如正方形、十字形、勺子形等，根据形状和解说就可以很容易辨认出星座来。每个季节都有自己的星座，无论从何时辨认都可以。无论是谁，只要开始研究辨认星座，大概都会一直坚持下去，直到认清天空中的所有星座，因为不断有熟悉的星座慢慢消失在西方，而新的星座又不断地从东方升起。

为了方便更好地认识各个星座，我们将夜空中的可见区域分为五个区。首先是北天星座，这是围绕着天极运行却永远不会降落的星座，终年都可以在北纬中部见到。其余四区的星座都有升降变化，而且大部分都会经过天顶之南。现在我们将每个季节晚上9点经过子午圈的星座划定出来，而且主要划出比较明亮的星星，这样做不仅可以避免混淆，还消除了各个星座之间的边界。

北天星座

我们在本书第一章的图1–2中已经描绘了北天星座，天球北极位于图的中心，星辰按照逆时针方向绕着它旋转，旋转一周的时间大约是23小时56分钟。如果想让这幅星图符合晚上9点的星空，只要将本月份转动到天顶上即可。

我们首先看见的是大熊座，七颗明亮的星星构成了大家都非常熟悉的勺子形。这个星座中的星星基本全年都能看见，只是在秋季它们接近地平线时可能无法被看到。再注意一下勺子顶端的两颗星星，这就是所谓的“指极星”，因为这两颗星星连成的直线指向北极星，北极星靠近图1–2的中心，与极之间的距离不足1°，因此成为北天极的标志。

北极星是小熊座中的一颗星星，位于勺柄的末端，星座中只有勺边的两颗星星最明亮，其他星星则非常微弱。那两颗星星被称为极的守卫，因为它们一直不停地绕着极旋转。

当看不见指极星却想寻找北极星时，只要望向正北方，北极星与地平面的角度恰好等于观测者所处地带的纬度。因此，在北纬45°地区，北极星就位于天顶和地平线的中央。

在北天极的另一边是仙后座（Cassiopeia），它的方向正好与大熊座相反，而且与北天极的距离也大致和大熊座一样。五颗明亮的星星构成字母W或者M形，它们与两颗比较暗淡的星星一起，构成了仙后的宝座，只是这个宝座的背部有些弯曲，如果不垫上靠垫，估计坐上去会非常不舒服。

仙后座的前方就是仙王座（Cepheus），它看起来像教堂的尖顶，顶上的尖恰好指向北极。仙王座的前面是天龙座（Draco），它差不多位于北天极与大熊座之间，头部为V形，天龙座似龙一般的身躯由一些比较暗淡的星星构成，可以借助星图找到它们。天龙座将北天黄极（north ecliptic pole）包围起来，而北天黄极正好位于龙头到北极星的1/3处。天龙座这一点上没有明亮的星星，它正好是天极慢慢画出的大圆的中心，这种缓慢运动由地球自转产生的岁差引起。

这就是北天中的五大星座，认识了它们之后，我们转向南天，选择适合观测季节的星图，暂且设定在秋季吧。

秋季星座

图6–1描绘的是秋季在南天中点缀的主要星座。垂直来看，月份下方是本月晚上9点会经过子午圈的星座，从天顶（靠近上边）一直到地平线（靠近下边）。

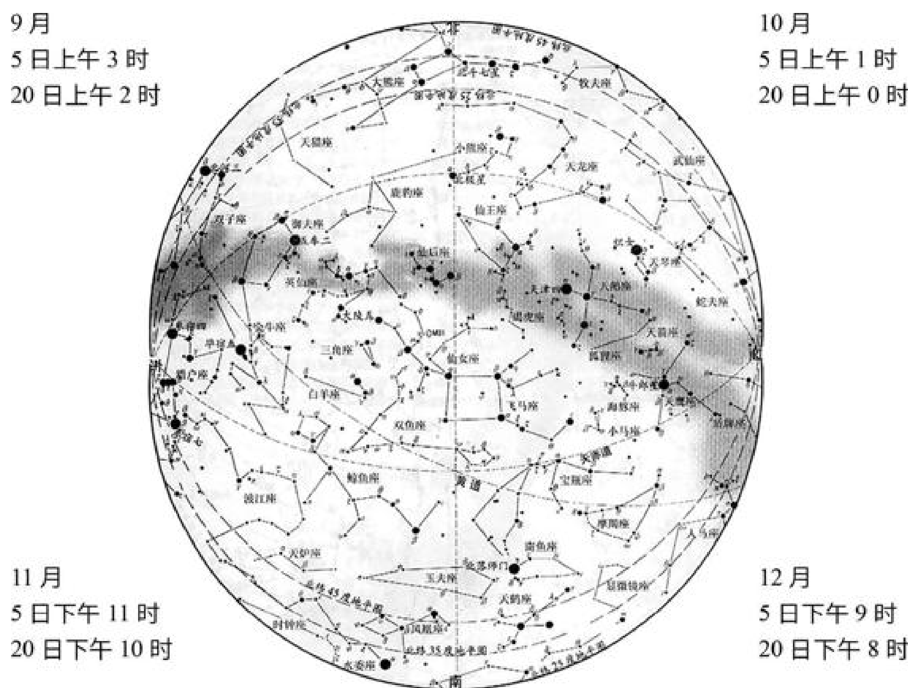


图6–1 秋季星座

在秋季天空中最容易辨认的是飞马座，它的大正方形是其主要特征。秋初时，飞马座从正东方升起，11月1日晚上9点它位于南天的最高处。四颗2等星构成了飞马座大正方形，每边大约是15°。正方形东北角的前面是仙女座（Andromeda）大星团，这是远在银河系之外的旋涡星系，而且也是最明亮的星系，我们会在后面详细介绍，肉眼看起来它是一块长长的雾状光斑。如果我们将飞马座的大正方形想象成勺子的斗，那么在它东北方仙女座中的亮星就是勺柄。不过，勺柄末端的星星属于其他的星座（英仙座）。

英仙座（Perseus）位于银河中，里面的星星排列成箭头，与仙后座相对。在这两个星座之间，我们会看到一块云状光斑，无论是在双筒望远镜还是其他望远镜中，都可以观察到它的两个星团，这就是英仙座双星团。箭头西边是排列成一条直线的三颗星星，中间的星星最亮，这就是变星大陵五（Algol），是蚀变星的代表。

我们现在所介绍的区域中存在着黄道三星座：宝瓶座、双鱼座和白羊座。黄道和赤道相交处的春分点（太阳于3月21日在此处）大约位于

飞马座大正方形东边线延长一倍的地方。2000多年前，春分点还在东北方的白羊座。白羊座中的主要星星构成一个扁三角形。

双鱼座的南方是大星座鲸鱼座（Cetus）。这个星座中最著名的星星是红色蒭藁增二（Mira），这颗星星平时肉眼不可见，一年中仅仅出现一两个月。我们已经了解了秋季星座，这里面只有一颗1等星，就是南鱼座（Piscis　Austrinus）中的北落师门（Fomalhaut），大约在10月中旬的晚上9点经过子午圈。

冬季星座

图6–2描绘的是冬季星座，这些是天空中最具耀眼光辉的星座。在寒冷的长夜中，亮星闪闪发光，呈现出各种颜色，为这凄冷季节平添温暖。猎户座是所有冬季星座中最引人注目的星座，其中的四颗星星组成一个长方形，在我们看来恰好直立于南方。图上方的东角是红色巨星参宿四（Betelgeuse），而下方的西角是蓝色参宿七（Rigel）。长方形中部横着的三颗亮星看起来像是猎户的腰带，而下面三颗暗星看起来就像是猎户的配刀。其实三颗暗星的中间有一颗不是星星，而是一个美丽的星云。猎户座中最壮观的风景就是大星云，但需要通过望远镜才能看见。

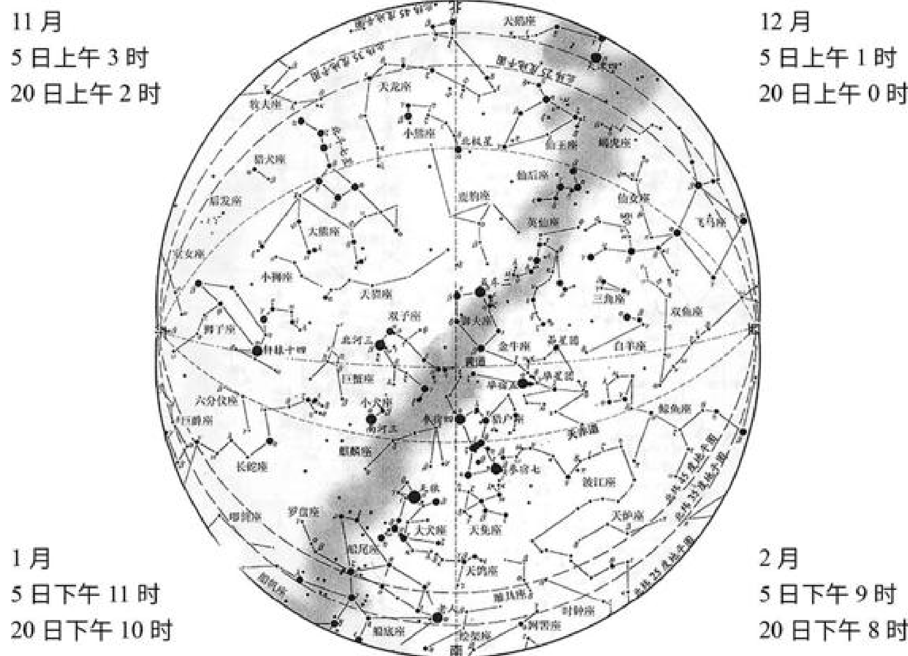


图6–2 冬季星座

随着猎户座的腰带向南望去，我们就会看见天狼星。天狼星是天空中最亮的恒星，位于大犬座（Canis Major）。猎户座的东方，与天狼星及参宿四形成一个等边三角形的星座，是一颗1等星南河三（Procyon），南河三属于小犬座（Canis Minor）。

猎户腰带的上方是毕宿星团（Hyades），V字形是它的显著标志，接着便是“七姐妹”昴星团（Pleiades）。这两者都是疏散星团（Open Cluster）的代表，我们会在后文详细介绍。毕宿星团在金牛座的头部，红色亮星毕宿五（Aldebaran）是牛眼，东边两颗亮星则是牛角。这两颗星星的上方就是御夫座（Auriga），其中的黄色大星五车二（Capella）是一颗亮星，也是北半天球中三颗最亮的星星之一。

这个区域中的金牛座、双子座和巨蟹座是黄道三星座。本区域中的黄道是最北的一部分。

双子座形状也是一个长方形，东边一端是两颗亮星：北河二（Castor）和北河三（Pollux）。1930年发现的冥王星就在这个星座中。巨蟹座的名称代表着北回归线，但它并不太明亮，其中最吸引人的

部分是星座中的鬼宿星团（Praesepe），肉眼看起来好像云斑一样，通过望远镜可以发现它是一个疏散星团。

冬季星座的区域中也包含了一部分银河，使得晴朗的夜空变得更加美丽，尽管它还是没有我们在夏季看到的那部分星空那样明亮动人。

春季星座

冬去春来，当冬季的群星从地平线上慢慢消失时，春季的群星就逐渐升起来了。这个区域中的领袖星座是狮子座，也最容易被观察到，它在傍晚的东天缓缓升起，人们将它视为春天即将来临的报讯者。在4月中旬的晚上9点左右，狮子座位于南方的天空中。

由7颗星星构成的镰刀形是狮子座的显著标志，刀把末端的那颗星是最亮的星，它是1等星轩辕十四（Regulus）；镰刀的东方是一个直角三角形，三角形最东边的星星是五帝座一（Denebola）。有些人根据这个星座中星星构成的图案，想象出了狮子的轮廓。

将五帝座一与大熊座中勺柄末端的星星连接起来，连线会经过两个星座，这就是后发座（Coma Berenices）和猎犬座（Canes Venatici）。后发座中有一个星团，其中的一些星星肉眼就可见。观测者通常喜欢通过大型望远镜观察这部分天空，因为其中有许多旋涡星云以及太阳系外的多种系统。

长蛇座（Hydra）是春季天空中最长的星座，横在南天中，像是一条由星星组成的不规则的线，几乎从巨蟹座南方一直延伸到天蝎座附近。它的中部附近是巨爵座（Crater）和乌鸦座（Corvus），这是两个非常有趣的星座，前者像一只杯子，后者则是由明亮星星组成的四边形。

让我们再回到北天看一下。在这个季节中，大熊座的位置比北极还高，而且勺子的形状倒转过来，将勺柄的曲线向南延伸，不久之后会遇到一颗很明亮的橙色的星星；再继续延伸，又会遇到一颗稍微暗淡一点的蓝色星星。第一次遇到的星星是牧夫座中的大角星（Arcturus），第二次遇到的星星是室女座中的角宿一（Spica）。牧夫座的形状像一个风

筝，而大角星就在风筝的尾巴处。

在黄道星座中，室女座是一个比较大的星座，但它没有清晰形象的图形，并不太容易辨认。角宿一、五帝座一和大角星一起构成了一个等边三角形。将角宿一和轩辕十四连接起来的一条线段，可以表示天空中黄道的一部分。在这条线段2/5的地方大约是秋分点,太阳经过天球上这一点的时间是9月23日。

夏季星座

夏季是各种各样有趣的天界景物出现最多的时候，也是观测变幻莫测的星空最好的时机。与牧夫座的东边紧挨着的是北冕座（Corona Borealis），这个星座很容易辨认出来，它是由许多星星组成的一个半圆形，缺口向北。

北冕座的东边是武仙座（Hercules），它看起来像是一只展开翅膀在飞翔的蝴蝶。这里恰好有一个肉眼可见的球形星团，也是呈现于望远镜中最壮观的景象之一。在北纬地区，这个恒星构成的球形星团是这一类天体中最为壮观的天界风景。武仙座东部中是“太阳向点”（solar apex），这是一个值得注意的地方，以全星系的角度来看，太阳系的全体成员都在向着这一点靠近。

武仙座的东边是天琴座，星座中包含着蓝色的亮星织女星，继续往东是北方大十字形，中轴正顺着银河。这就是天鹅座（Cygnus），里面最亮的星是天津四（Deneb），位于大十字的顶端。银河在这个地方变成两条平行的支流。顺着这样的河流我们继续往南走。

我们会从两个小星座的附近经过，这两个小星座是天箭座（Sagitta）和海豚座（Delphinus）。再过去一点是较大的天鹰座（Aquila），其中的三颗星星排列成一条直线，最明亮的是河鼓二，也就是牛郎星（Altair），其余两颗则比较暗淡。在此之前，银河的西支流一直比较明亮，但到了这个地方开始变得暗淡，甚至消隐不见，之后又在南方重现。与此同时，银河的东支流变得明亮起来，在人马座中聚集成了许多大星云。这个黄道星座的主要特点是，其中的六颗星星一起构成了倒转的勺子形。

人马座的西边是天蝎座，它同样是一个黄道星座，也是夏季夜空中最美丽的星座之一。大约在7月晚上的9点，它会从子午圈经过，其中最明亮的红色星星是心宿二（Antares），它是已知的最大恒星，直径大约是太阳直径的400多倍。位于南部低空的天蝎座和此时将要接近天顶的北冕座之间有着一块大的空白，由巨蛇座（Serpens）和蛇夫座（Ophiuchus）两个星座做了填补。

认识了这么多星座后，大家也许会发现，找到天空中的星座并了解它们并不是一件困难的事情，而且意义非凡。因为当我们再次仰望夜空时，看见的不再是堆积在一起的无意义的群星，它们有着鲜明的形象和具体的名称。在这样的观测过程中，美丽星空的吸引力也会越来越大，以至我们会惊讶于夜空中有着那么多有趣的事，而从前竟然没有发现。

恒星的本质

在相当长的时间里，人们对星辰的守望始终只是将其看作夜晚天空中闪闪发光的点缀。人类在早期就观察到星辰会聚集起来，组合成各种形状，特别是星空对夜间时刻和季候的显示，更是为人们所利用。

在早期的天文学研究中，天文学家的工作几乎都是围绕地球周围的天体，即太阳、月球和明显的行星而展开的。这些天体的特殊光亮以及它们在天空中的运行，都使得它们引起了大家的特别关注。远处的恒星尽管看起来是固定不变且不可思议的，但它们可以作为指示标，标示出那些不断变化的天体。这也正是星图很早就出现的原因。

哥白尼的日心说被发表之后，一方面确立了太阳在行星系统中的中心地位，另一方面也让人们明白了太阳仅仅只是一颗恒星，它之所以看起来很明亮，是因为和地球之间的距离非常近。于是，遥远的恒星也被人们看作是同样发光发热的“太阳”，而且可能有行星和卫星绕着它们运行。

我们研究太阳时得到的一切特征大概都与恒星相符，它们都是高温气体构成的巨大球形，分为光球、色球、日冕、日珥等。它们一直在向

空中释放能量。然而，即便用肉眼也可以看出，恒星显然不是太阳的复制品，因为其中有蓝色星、红色星以及跟太阳相似的黄色星。

借助望远镜，我们观测到了许多肉眼无法看见的星星，但除了几个显著特征外，望远镜并没有带领我们认识恒星的本质，因为就算是最好的望远镜也不能让我们看清楚恒星的内部结构。当其他的特殊仪器发明并应用之后，我们才对恒星的本质有了更进一步的了解。而最早用于恒星研究的设备是分光仪。

星光的分析

分光仪是天文学中用来分析天体的光的一种仪器，借助安装在上面的一枚或者多枚棱镜，或者再添加一个光栅，仪器可以将光分解成一条色带，这就是“光谱”。光谱中的颜色和天上的彩虹一样，从光谱的一端到另一端出现的颜色依次为紫、靛、蓝、绿、黄、橙、红7种，而且包含了渐次的等级。

用两架小型望远镜对准棱镜，把第一架小望远镜中的目镜替换为一道狭缝，这里就是接收光线的地方。将分光仪连接到望远镜上，此时的狭缝位于目镜的焦点上。当光经过狭缝之后，第一架小型望远镜中的透镜让它成为平行的光线，然后通过棱镜就形成了光谱。通过第二架小型望远镜进行观测——但常常用于摄影，借助于安装在一部分狭缝上的反射望远镜，又可以随着天体的光谱拍摄一些已知元素（如氢、铁等）的光谱。只有通过上面我们讲的狭缝分光仪才能拍摄到这种比较光谱，但这样做起来有一点麻烦，因为一次只能显示一颗星星的光谱。

另一种分光仪器是物端棱镜分光仪，它可以同时显示许多颗星星的光谱。这种仪器就是在大型望远镜的物镜前面添加一个大棱镜，这样拍摄出来的图片是望远镜观察到的区域中的星星光谱，每一段短光谱都代表一颗星星。

实际上，最早开始进行天体光谱分析的是夫琅和费，他也是制作大型望远镜的先驱，我们在前面的内容中已经做过详细介绍。夫琅和费在1814年通过自制的分光仪研究日光，第一次发现许多从光谱中经过的细小暗线。他将光谱中从紫色到红色的明显暗线用字母标记出来，这个系

统一直保留到今天。这样一来，黄色区域中两条相邻的暗线被命名为D线，如图6–3所示。

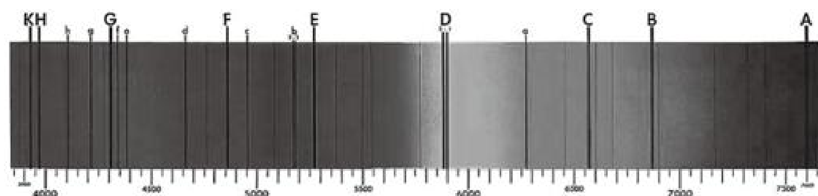


图6–3 夫琅和费光谱线

1823年，夫琅和费开始研究恒星的光谱，他也在其中发现了各种暗线花样，随着恒星红色程度的增加，这些花样变得更加复杂。著名物理学家基尔霍夫（Kirchhoff）提出的定律，成功地揭示了这些暗线的秘密，我们将这个定律的结论概括如下：

在黑暗背景中，一种发光气体的光谱能够呈现出各种颜色的谱线花样，花样会随着构成这种发光气体的化学元素的不同，而表现出不同的特点。好比无线电台可以用不同的波长播音，但都可以通过调谐检验出来一样，发光气体中的每一种化学元素同样可以通过它发射出来的光的波长辨认出来。在特殊情况下，一个发光的固体或液体甚至气体，能够发出连续的光谱，说明它发出的是白光。假如在我们和这光源之间存在着比较冷的气体，它就会将白光中与它发出的相等的波长吸收掉。这样叠加在一起的光谱就是各色连续带上的暗线花样。通过暗线花样，我们可以得知干涉气体的组成成分。恒星的暗线光谱的意义，就是表明恒星大气吸收了从恒星光球发出的白光中一些选定的波长。

恒星光谱的花样

哈佛天文台及其在秘鲁的阿雷基帕分所（现在转移到了非洲南部的马萨尔波尔）对恒星光谱的摄影研究，已经长达一个世纪。这项工作中采用的是物端棱镜，为天空中各个区域拍摄的成千上万张照片都被仔细保存并认真研究。这项研究工作的结果，是有超过35万颗恒星的光谱清楚地呈现在我们面前。只要查阅一下HD星表（这是哈佛天文台编辑的世界上第一个记录恒星光谱的大型星表，1937到1949年间出版了第一期

星表的补表，使HD星表记录的恒星数目达到了359,083颗），便能够得知恒星的亮度和谱型（spectral class）。接下来，我们需要对“谱型”这一名词做个解释。

在所有已研究过的恒星的光谱中，除了少数例外情况，线的花样可以归纳为相连的序列。一颗等待研究的恒星的光谱几乎一定是这个序列中的一部分。将这些花样平均分开并标上任意字母BAFGKM，然后将中间分成10等分。举个例子，我们研究发现，一颗恒星的光谱的暗线花样位于序列BA中间，那么这颗恒星的谱型就是B5。这种表示恒星光谱的方法是由哈佛天文台创立的，被称为德雷伯分类法（Draper classification）。

在B型恒星光谱中，占据主导地位的是氦线。人们第一次在太阳光球中发现这种气体，因为在光谱中出现了从来没有见过的线。猎户座中位于腰带处的三颗恒星中的中间那颗就是氦星。

在A型恒星光谱中，最显著的是氢线，如天狼星、织女星的光谱。各种谱型的光谱中都含有氢元素，这一型的恒星都呈蓝色，暗线花样的连续从蓝色到红色渐次排列。

在F型恒星光谱中，都是带黄色的恒星，如北极星、南极老人星（Canopus）。它们的光谱中只有少量的氢线，但含有大量的钙、铁等金属线。

在G型光谱中，太阳代表恒星。它是一颗黄色星，光谱中有数不清的金属线。大角星则属于K型星，其光谱中的金属线比G型的更明显。K型的末端以及M型中的红星，如猎户座中的参宿四和天蝎座中的心宿二，它们光谱中的宽带褶纹和许多暗线都显而易见。

上述便是光谱序的主要组成部分，此外还有大家都认可的4型星，但包含的恒星数目还不到全部恒星数的1%。以前大家认为这一序列中，从蓝色星到红色星就能够代表恒星的发展史了。蓝色星表示幼年，如太阳一类的黄色星表示中年，而红色星表示老年，恒星会越来越红，也会越来越暗，最后彻底消失。不过，有一种新的学说认为，红色星中的一部分可以表示恒星的童年时代，当恒星逐渐衰老时，它会变黄、变蓝，

最后再变成红色，进入老年时期。当然，关于恒星的演化，还有其他学说被不断提出。

恒星的温度

对于一块金属来说，热到呈现蓝色时，要比呈现红色时的温度更高，我们据此判断蓝色星的温度比红色星的温度高。相应的研究数据证明我们的判断是正确的，而光谱序确实体现了温度从高到低的变化。恒星光谱的检验不仅证实了这一结论，还测量出了各个光谱型的恒星的温度值。近几年，天文学家又测量出了恒星散发的热量。

我们在讲述太阳的那一节中说过，测量太阳的温度，可借助日光下的一盆水的温度升高情况来进行一些计算。显然，这种简单的方法无法计算恒星的温度。佩蒂特（Pettit）和尼科尔森（Nicholson）通过另一种方法得出了相同的结果。他们借助威尔逊山的2.5米望远镜，将恒星的光聚集在一个非常小的热电偶[1]上，然后通过电流计的偏转观察其热效应。通过这种方法可以测量出低于肉眼能见度几百倍的恒星的热量，他们也因此测出了恒星的温度。此外，他们还用这个方法测量出了行星和月球表面各个部分的温度。

蓝色星的表面温度在10000℃到20000℃之间，甚至更高。黄色星的表面温度大约是6000℃，而红色星表面温度仅仅只有2000℃左右。然而，就算是温度最低的恒星，依旧是非常热的。

光球之下的恒星，随着深度的增加，温度也会迅速升高，中心温度可能高达千百万摄氏度。关于恒星发光的来源，大家的看法比较一致，都认为巨大光能来源于光球中心的热核反应，首先是氢聚变为氦，然后聚变为碳、氮、氧……一直到铁，才逐渐停止。

巨星和白矮星

恒星的“发光本领”（光度，luminosity）有着很大的不同，简言之，恒星之间的实际亮度是存在极大差异的。如果我们能够将恒星和太阳排列在同等距离的一个平面上，我们会发现，它们的亮度存在从太阳亮度的万分之一到几万倍的差异。事实上，天文学家测量的是恒星在某

一标准距离上应有的亮度。在下面的内容中我们会详细介绍如何测量恒星的距离。

我们可以利用一张方格纸，在上面用一个点来表示在一个相当的地方已知其发光本领和谱型的恒星，图6–4就是我们绘制出来的“光谱光度简图”。其中，水平线自左到右表示的是各种谱型，从蓝色星到红色星；垂直线则表示恒星的实际亮度，以太阳的亮度作为基本单位，从下到上逐渐增大。

通过对图6–4的观察，我们可以了解，大部分恒星（包括太阳）分布在从左上角到右下角的斜线上，这就是“主星序”（main sequence）。沿着这条斜线往右，恒星的温度渐次降低，同时也变红、变暗、变小。

主序星的上方是两个群点代表的星星，其中一个群点表示发光本领平均为太阳百倍左右的“巨星”（giant star），另一个群点表示发光本领比太阳亮数千倍的“超巨星”（supergiant star）。我们来认真看看某一特殊的恒星，如红色M型星。由于它们的颜色和表面温度都相同，因此它们表面每平方米的亮度也必然相同。对于M型星来说，任何一颗恒星的表面1平方米的亮度一定等于另一颗同型星上同样大小表面的亮度。巨星和超巨星的亮度是同型主序星的若干倍，所以它们的表面积也是主序星的若干倍，它们更为明亮的原因是体积更大。

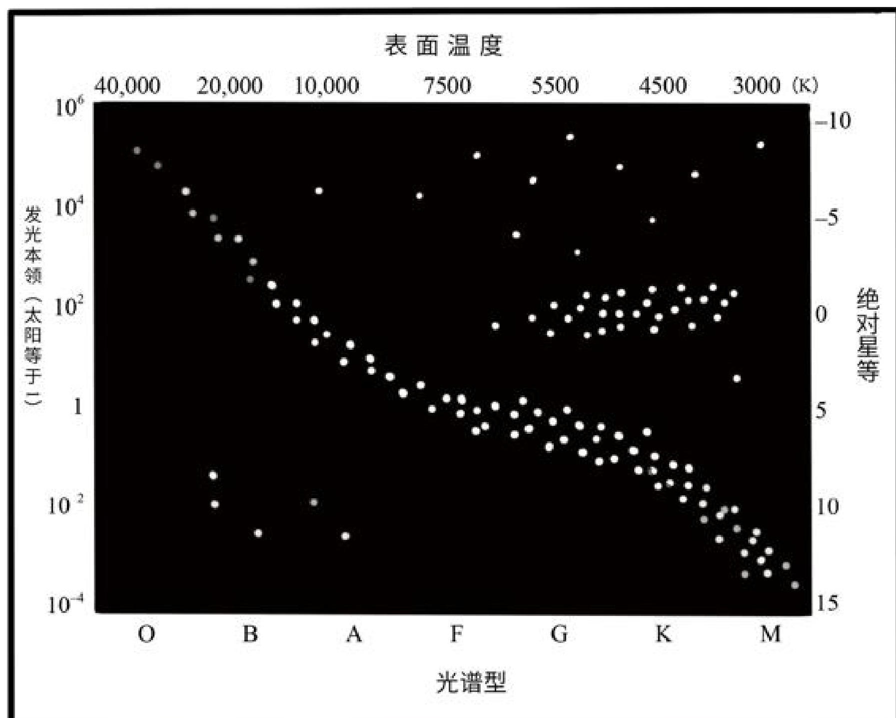


图6–4 光谱——发光本领图解

图6–4的左下角还分布着一小群恒星，它们就是“白矮星”（white dwarf），其中最著名的是天狼星的暗弱伴星。由于白矮星的亮度只有主序星亮度的千分之一，它们的表面积同样也只有不到千分之一。不过，白矮星比主序星中红色星更亮一些，只是比红色星更小，这是由于白矮星每平方米亮度更大（不过与中子星相比，白矮星算是个子较大的恒星了，中子星是恒星演化晚期的产物，它是当前所知的宇宙中最致密的物质）。

恒星的大小

恒星的称量方法与行星的称量方法相差不大，同样是借助于它们施加在邻近物体上的引力。我们在前面已经介绍过，如果想要准确测定一颗没有卫星的行星（如水星）的质量是一件非常困难的事情。但是如果行星有自己的卫星，那么要解决这个问题就简单许多。同样的道理，想要测定一颗孤立的恒星的质量会是难上加难的事，因为恒星之间的距离太过遥远，所以很难观察到一颗恒星对另一颗恒星的吸引力。

幸运的是，天文学家通过望远镜观测恒星时，发现了数以千计的双星，而且大部分双星都是相互旋转的。分光仪也显出了许多更接近的双星。对于某些特定的距离而言，双星的公转周期越短，它们的质量和就越大。只要能测量出平均的分离距离和公转周期，就能计算出双星的质量和。甚至，有时还能够计算出双星中任意一颗星星的质量。

天文学家对双星的研究得出一个惊人的结果：恒星的质量大多比较平衡，从太阳质量的1/5到太阳的5倍不等，所有的恒星几乎都相等，而太阳的质量在其中属于中等。不过，太阳绝对不是有些人认知中的二流以下的星星，所以，我们有理由骄傲一下了。

在前文的讲述中，我们分析恒星的发光本领时，获得了一些关于恒星大小的数据。我们发现在主序星中以太阳为对比，更蓝一些的恒星就要大一些，更红一些的恒星则要小一些，白矮星小得多，巨星大得多，而超巨星则是最大的恒星。通过由图6–4所得的情形计算，我们也得出了上述结论，并且计算出了单颗恒星直径的大致准确值。如果想要用直接测量月球和行星直径的方法直接测量恒星的大小，是不太可能的，因为就算是使用最好的望远镜也无法显示出恒星真正的圆面。如果我们记住了这一点，那么一定会对天文学家的聪明睿智无比佩服，因为他们居然能够从点点星空中发掘出这么多有意义的东西。

从1920年开始，威尔逊山开始应用迈克尔逊（Michelson）式测量恒星直径的干涉仪。开始是将干涉仪连接在2.5米反射望远镜上，后来分离。虽然这种测量方法有些繁复，但测量出来的一些恒星的直径相当准确。通过测量得知，恒星心宿二的直径大约是6.4亿千米，第一颗被测量出直径的恒星是参宿四，大约是心宿二的1/2。这些红巨星的体积都非常大，远超我们的想象。

恒星的质量大体相等，但体积却有着巨大的差异，因此它们彼此的密度也有着很大的不同。红巨星的物质分布非常稀薄，如心宿二的平均密度只有地球空气密度的1/3000。

与红巨星相对的是白矮星，它们的物质分布非常致密，其密度大到令人不可思议。白矮星的大小与行星相似，但质量却可与太阳相提并论。天狼星的暗弱伴星的平均密度大约是水的密度的3万倍。有人推

测，在非常高的温度下，这颗伴星中的原子无法完全存在，所以它的组成物质可能是地球上不存在的致密物质。

尽管有着似乎难以否定的证据，但想要得到所有天文学家和物理学家的认可依然很困难。实际上，大家都不相信天狼星的伴星的密度会是水的密度的3万倍，换言之，在这颗恒星中，即使是一个普通玻璃杯的材料也重达七八吨。如果没有充足的证据加以佐证，显然难以让人信服。根据相对性原理，非常致密的恒星的光谱中的线纹会朝着红方移动。在威尔逊山和利克天文台两个地方，天文学家已经发现了天狼星光谱中的这种移动。

变星

一般来说，大部分恒星的光辉并没有发生过变化。因此，当我们想到这巨大的能量是从恒星光球中流出，而且恒星内部的有效作用能够一年又一年、一个世纪又一个世纪地为光球提供能量时，一定会觉得非常诧异。不过，有些恒星的辐射能量会发生变化，这一类恒星被称为变星。我们将因食而变光的恒星放到后面详细介绍。

天文学家在1596年将鲸鱼座中的蒭藁增二定义为变星，这是第一颗被认为是变星的星。有时候只有通过望远镜才能观测到它，它的亮度类似于9等星；有时候，它又会变得非常明亮，即使肉眼也能看出它是一颗亮星。这种变化的周期大约是11个月。蒭藁增二是“长周期变星”（long period variable）的代表，这类星大部分是红巨星或者超巨星。其他红巨星，如参宿四，变光很小而且没有规律。而有些恒星的变光能够被部分预测到。

现在被人们讨论得最为广泛的一种星是“造父变星”（Cepheid variable），它们的确有着非常大的价值，我们下一节中会重点介绍。“造父变星”的名字来源于仙王座δ星（Delta Cephei），它是变光的最初例证之一；标准的造父变星都属于黄色超巨星，它们的变光无论是在周期，还是在方式上，都有着规律性，尽管全部变星的周期排列起来在1到50天之间，但大半的周期都在一个星期左右。这些星星的变光不只在质和量两方面有变化，最亮时也要比最暗时高出大约一个全谱型。

并不是所有造父变星都与上述情况符合，甚至有一半不符合这样的标准。它们和其他恒星有许多共同之处，但也有巨大的不同。由于它们常出现在大球状星团中，因此又被称为“星团造父变星”（cluster-type Cepheid）。它们都是一些蓝色星，变化周期大约是12个小时。这些恒星中的任何一颗都不为肉眼所见。

一般设定造父变星（可能还包括其他真变星在内）的脉冲引起了这些恒星的光的变化，简单地说（也许真的是太简单了），这个学说认为变星是有规律地涨和缩。当内部热量比较多时，恒星会变得又亮又蓝；但恒星膨胀之后温度会降低，所以会变暗变红；等到恒星的温度降到最低，而且变得非常冷时，就会开始收缩。这样的脉冲一旦开始之后，便会持续一段比较长的时间。这个简单学说存在一个明显且难以马上解决的困难。那就是造父变星最明亮的时候事实上并不是最紧缩的时候，而是在之后的1/4周期时，那时它的膨胀程度很厉害。显然，这颗恒星的变光与恒星的本质有着密切联系。

恒星的演化

在将宇宙演化理论看得非常重要的时期，人们认为星云是宇宙中的原始材料，但是他们并不知道星云是怎么形成的。星云可能是最原始的混沌，后来逐渐衍生出了恒星、行星等天体。哲学家康德（Kant）在200多年前首先提出了星云假说（nebular hypothesis），他将星云定义为宇宙发展的第一个阶段，因为他觉得这是无法由其他物质发展而来的最简单形态。在康德的理论中，演化过程就是从简单到复杂。后来的学说大致也延续了康德的这种观点，其中最著名的是由拉普拉斯提出的，关于宇宙演化的星云假设（Laplace's nebular hypothesis），他专门研究了太阳系的演化过程。

一直到20世纪30年代，大家依然认为恒星是由明亮星云（如猎户座大星云）凝缩而成的，而且还觉得恒星的颜色代表着它们的不同年龄。最年轻的恒星热量最高，因此蓝色星是青年期；当它们逐渐冷却、凝缩之后，便成了中年期的黄色星，如太阳；等到老年之后，热量变低，这就是红色星。恒星的光渐渐变红变暗，最后光芒尽失。不过，这种古典的理论存在一定的缺陷，我们无法解释为什么冷的星云的第二个阶段是

最热的星，但蓝色星和亮星云之间的密切关系显示出它们都很年轻，如昴星团中的蓝色星就处于星云之中。不过，我们已经清楚了解这种关系有了新的含义，星云是被附近的炙热恒星照亮的。

最初的星云演化学说遵循的是一条发展的路线，从稀薄的星云到致密而暗弱的恒星。不过，罗素在1913年提出，从蓝星到红星存在两支变化程序：一支包含比太阳更大更亮的巨星和超巨星，其中最巨大、最稀薄的是红色星；另一支包含较小的主序星（含太阳在内），这些恒星的颜色越红就越小越致密。为了解释这个新的论据，恒星演化的新学说也在被不断提出，并在其后广为流传。暗星云慢慢凝缩成恒星，最初是大的红星，温度很低，且表面每平方米的亮度也很低，但由于它们的体积很大，所以看起来就成了最亮的星。之后，恒星会慢慢在某个时期缩小，凝缩所产生的热量要大于辐射出去的热量。它们的温度越来越高，从红色逐渐变成黄色，然后又变成蓝色。此时凝缩变得缓慢，得到的热量小于释放出去的热量，恒星的温度慢慢降低，从蓝色慢慢变成黄色，再变成红色，最后不再发光。

两种学说都是以星云为开始，以暗星为结束，而且要点都是凝缩。当我们对这些学说进行研究时，需要考虑一下将来的某个时机是否会没有星云，而且所有恒星都会彻底消失。不过，我们需要注意，这是在讨论一个非常难以解答的先驱学说。宇宙的发展变化非常缓慢，所以难以追踪，我们并没有充分的证据能够证明恒星在不断地凝缩。

恒星的演化是一个漫长的过程，而且十分复杂。现在我们认为恒星的终极形态可分为三类：第一类，大质量恒星的燃料耗尽之后自己爆炸，碎片散落在各个地方，然后又慢慢聚集在一起，为将要产生的新恒星提供条件。第二类，超新星爆发之后，会将中心天体（中子星或者夸克星）遗留下来，散发出具有规律性的脉冲，这就是我们所熟悉的脉冲星。当休伊什（Hewish）和他的学生乔斯林·贝尔（Jocelyn　Bell）第一次观测到这些脉冲时，还曾认为这是外星人传递出来的信号。第三类，发生引力的进一步坍缩，形成恒星级别的黑洞。这也是目前天文学界的热门话题之一。

新星

在所有的星辰，乃至一切天体现象中，最引人注目的就是新星（nova）。“新星”并非指新形成的星，而是表面始终非常暗弱、与大多数恒星一样永恒的星，在我们不知道原因的情况下突然炸裂。在几个小时内，它们从不可见一下子变得明亮无数倍，当它们的亮度达到顶峰时，可以与最明亮的恒星相提并论；就算在数量稀少时，也比得上最亮的行星。此后，它们渐渐变暗，最后缓缓沉入黑暗中。

1572年，最美丽的新星出现在了仙后座，人们常将它称为“第谷星”（Tycho's star）。因为它是由天文学家第谷（Tycho）首次观测到的，尽管第谷并不是第一个发现这颗新星的人。第谷星的最高亮度和金星的亮度相同，之后逐渐变暗，大约6个月后彻底消失不见。蛇夫座中的“开普勒星”（Kepler's star）的亮度非常高，甚至超过了木星的亮度。开普勒星发现于1604年，肉眼可见的时间长达一年半，但当时还没有望远镜可以对它进行持续的观测。

20世纪初期，天空中出现了4颗非常亮的新星。首先是1901年英仙座中的新星，它看起来比五车二更亮；然后是1918年天鹰座中的新星，它是300多年来最亮的新星，比除了天狼星外的所有恒星都亮，亮度在两三天之内增加将近5万倍；第三是1920年天鹅座中的新星，它的亮度类似于天津四的亮度，位于天鹅座的大十字顶端；最后是1925年绘架座（Pictor）中的新星，它最亮时达到了1等星的亮度。

以上这些都是突然出现的明亮新星，不过，还有许多新星在其最亮时也不为肉眼所见，而有一些只能借助于摄影才能发现。显然，还有许多人们没有发现的新星。有人推测我们周围的恒星中，每年至少会出现20颗通过小型望远镜才可以观测到的新星，而银河系之外还存在着无数颗新星。

总之，新星并不是罕见之物，大概每颗恒星在漫长的生命过程中都会拥有这样特别的炸裂时刻。然而，只要想到我们的太阳也许有一天也会如此，那将会更加有趣。当然，这种事情的发生对于地球上的生物会是一场大的灾难。我们难以想象平时温顺的恒星会发生这样的炸裂。通过望远镜、分光仪以及摄影照片，天文学家得到了许多关于这种现象的资料。我们认为，新星伴随着恒星的死亡而出现，这是由引力坍缩导致

的。当恒星在晚期无法向外释放充足的能量时，引力开始发挥巨大威力，通过各种剧烈的物理变化释放出巨大能量。

我们现在已经把所知道的恒星的各种特点进行了一番考察，我们可以对本节标题所包含的问题做一个简单总括的回答了。什么是恒星？有位诗人曾写下这样一首小诗：“小星！小星！眨眨眼睛，我们真惊奇，你是什么东西？”诗人仅用文字表达出了惊奇。而天文学家在惊奇之余，还要努力去探索其中的奥秘，当然，这也是他们难以推卸的责任。我们已经看到了他们在短期内的探索成果，这是值得肯定的。

恒星是宇宙能源的储存器，也是大自然建造复杂工程的砖瓦。它们都是由炽热的气体组成的球状物，其中各个恒星所含的气体的量相差并不大，不过体积却有着巨大的差异，它们按直径排列可以从白矮星的几万千米一直到红色超巨星的几亿千米。白矮星的重量是水的几万倍，而超巨星的重量却只有空气的几千分之一。恒星中心，密度极大，温度也高到超乎人们的想象。有些恒星变光，让人联想到脉动，而有些恒星会炸裂。这些就是所谓的恒星。

中子星

假如白矮星的密度大到让你觉得不可思议，这里还有让你更加惊讶的。我们下面要介绍的就是一种密度更大的恒星——中子星。中子星的密度大约是10^{11}千克/立方厘米,也就是说，中子星每立方厘米的质量高达1亿吨！而白矮星每立方厘米的质量大约是几十吨，相比之下似乎不值一提。实际上，中子星的质量如此之大，半径10千米的中子星的质量大约等于整个太阳的质量。

中子星和白矮星一样，都处在恒星演化过程中的后期阶段，并在老年恒星中心渐渐形成。不过，能够形成中子星的恒星，其质量得足够大。通过计算得知，当老年恒星的质量是10个太阳的质量时，这颗恒星就有可能变成中子星，而质量小于10个太阳的恒星通常只会变成白矮星。

不过，中子星和白矮星的主要区别并非只是形成它们的恒星的质量差异，而是它们的物质存在形态完全不同。简而言之，尽管白矮星的密

度很大，但依然属于正常物质的密度范围——电子以电子形式存在，原子核以原子核形式存在。而在中子星里，物质受到的压力非常大，白矮星中的简并电子压无法承受，于是电子被挤压到原子核中，与质子结合在一起形成中子，导致原子核中的物质仅余中子，而几乎整个中子星都是由无数个这样的原子核一起构成的。因此，我们也可以将中子星称为巨大的原子核（除了表面的壳之外）。

在形成过程中，中子星与白矮星也非常相似。当恒星外壳膨胀时，反作用力促使恒星核收缩，在巨大的压力及由此导致的高温下，恒星核会发生各种复杂的物理变化，逐渐演变成中子星的内核。而整个恒星将以一次相当壮观的爆炸来结束自己的生命，人们将这种现象称为“超新星爆发”。

中子星的表面温度大约100多万度，辐射出X射线、γ射线和可见光。中子星的磁场非常强大，促使极冠区沿着磁场方向不停地放射无线电波。中子星的自转速度非常快，每秒钟可达好几百圈。由于磁极和两极一般是不吻合的，所以如果中子星的磁极正好对着地球，那么中子星随着自转发射出的电波会像旋转的灯塔一样数次扫过地球，从而产生射电脉冲。我们将这样的天体称为“脉冲星”。

黑洞

1968年，美国物理学家惠勒发表了一篇题为《我们的宇宙，已知的和未知的》的文章，并在文章中第一次提到“黑洞”一词。他不愿意使用“引力坍缩物体”这个专业烦琐的词语，所以创造了“黑洞”这个简洁又具有概括性，而且非常响亮有力的名词。所谓黑洞，指的是有这样一种天体：它的引力场强大，就算是光都无法从其中逃脱。根据广义相对论，引力场能够使时空弯曲。如果恒星的体积非常大，它的引力场对时空造成的影响很小，从恒星表面某一点发出的光线可以朝着各个方向沿直线射出。相反，恒星的半径越小，它的引力场对周围的时空弯曲作用就越大，向着某些方向射出的光线会沿着弯曲时空再次返回到恒星表面。等恒星的半径小到一定程度时，垂直表面发射的光线都会被捕捉到，此时的恒星就变成了黑洞。

一颗恒星渐渐衰老时，热核反应几乎将中心的燃料（氢）耗尽了，此后能够产生的能量就非常少了。如此，恒星的力量已经无法撑起重量巨大的外壳，外壳在重压之下会导致核心坍缩，最后形成一个密度大、体积小的星体，再次与外壳的压力相平衡。

质量比较小的恒星主要转化成白矮星，而质量比较大的恒星则慢慢形成中子星。根据计算，我们得出中子星的质量不会超过太阳质量的三倍，如果超过了这个值，将没有什么力能抵消自身的重力，从而导致再次大坍缩。

这一次，物质将会毫无阻碍地朝着中心点发展，最终成为一个体积接近零，而密度无限大的“点”。当它的半径缩小到一定程度时（史瓦西半径），巨大的引力就会将所有的东西困在里面，哪怕是光线也无法射出，从而使得恒星与外界失去联系，黑洞就此形成。

黑洞是所有的天体中非常特殊的一种。例如，我们不能直接观测黑洞，只能凭借想象力猜测它的内部结构。根据广义相对论，引力场会使空间弯曲。此时，尽管光在任意两点之间依然沿着最短距离传播，但路线已然不再是直线，而是曲线了。

由于地球上的引力作用较小，因此弯曲的程度几乎不被察觉。但是，在黑洞周围，空间扭曲却非常严重。于是，即便恒星发出的光被黑洞挡住，一部分会被黑洞吸收，可另一部分还是会通过弯曲的空间到达地球。因此，我们很容易就能观测到黑洞背面的星空，好像根本不存在黑洞一样。人们将这种现象称为黑洞的隐身术。

那么，天文学家如何才能发现黑暗而渺小的恒星级黑洞呢？当巨大恒星坍缩形成黑洞时，尽管所有的物质都消失了，但强大的引力依然存在，不会消失。因此，如果一个黑洞与一颗亮星构成了相互绕转的双星系统，那么黑洞的强大引力不仅能促使亮星移动，还可以将亮星中的物质吸进，然后炸裂成碎片。这些碎片的温度高达10亿摄氏度，将会向外散发出强烈的X射线。如此，寻找黑洞的问题就转化成寻找X射线源了。

X射线双星有两种类型：一种是大质量X射线双星（massive X–ray binary，MXRB），由比太阳质量还大的亮星或者中子星与黑洞一起构

成；另一种是软X射线暂现源（soft X–ray transient，SXT），或X射线新星。当致密天体吸收亮星物质时，X射线的强度会剧增百万倍。随着物质输送速度的减慢，在6个月到1年的时间内，X射线强度也会逐渐降低，双星系统在这之后也逐渐恢复平静，平静时期大约能维持10年之久，但在可见光或者红外波段依然可观察到亮度的变化，这是X射线束使致密天体周围的吸积盘外面的区域发热发光造成的。

对于能够看见两颗恒星的双星系统来说，通过测量它们的可见光谱线的红移和蓝移，我们能够确定视速度的变化以及双星相互绕转的轨道周期，由此确定它们的质量。虽然现在我们无法测定不可见天体的光谱，但幸运的是，我们可以借助一个质量函数推测不可见天体的质量范围。

恒星的距离

我们在“太阳系的比例尺”一节中，已经对测量天体距离的原则进行了介绍。我们将地球半径作为基线标准，或者通过地球表面两个点之间的连线，测量月球行星及相邻的天体。但是，如果想要测量恒星之间的距离，这样的基线就太短了。因此，我们常常将地球公转轨道的半径作为基线，或者将连接地球轨道接近两极处的线作为基线，以此测量恒星之间的距离。随着地球从轨道的一边移动到另一边，恒星位置的移差还是几乎小到无法测量，要想得出足够准确的测量结果，需要对恒星进行比较。



图6–5 恒星视差的测量

图6–5中，左侧的小圆圈表示地球公转轨道，S表示恒星,且设定为距

离地球比较近的恒星；虚线表示距离地球比较远的恒星T的方向。当地球在其轨道一边，即上方的P点时，我们测量出两颗恒星之间很小的角SPT，在我们看来是这个角把两颗恒星分开了。当地球移动到对面，也就是位于轨道下方的Q点时，我们测量出两颗恒星之间的SQT角。现在我们已知最远恒星的距离，应用三角计算方法将两个角度的差除以2，就能得到恒星S的视差了。确切地说，这仅仅是观测到的相对视差。因为更远的那颗恒星会缓慢移动，如果在计算过程中考虑到这样的移动，最后得出的就是绝对视差。

事实上，对一颗恒星的方向只观测两次是远远不够的，恒星看起来虽然静止不动，但它们实际上都在高速运动着，方向也在不断发生变化。如果通过望远镜观测比较近的恒星，这种“自行”（proper motion）状况会更加明显。因此，对于相隔6个月的两次观测来说，我们无法确定得出的移差中该恒星的自行占了多大的比例，又有多少是由于我们观测位置的改变造成的视差。为了对这两点有清楚的认知，观测时间必须持续两三年以上。

摄影法是现代测量视差常采用的方式。将一架长望远镜对准包含了想要观测的恒星的区域，然后让底片在望远镜焦点位置曝光。等到6个月后，再对这个区域进行拍照，根据其他较暗且大致较远的星来确定这颗恒星的位置，其他星在这时被称为“比较星”（comparison star）。这项工作非常精细和缜密，因为最近的恒星的移差也只有1.5弧秒。这类似于在3.2千米的距离外去观察一个直径为2.5厘米的物体所形成的对角。大部分这样测量出来的恒星的视差都会更小。

当确定了恒星的视差之后，要计算出这颗恒星的距离就很容易了，接下来要解决的只是如何表示这个数字。如果想要以天文单位数（地球和太阳之间的平均距离）来表示这个距离，只需要用视差除206,265即可。长期被认为是最近的恒星的半人马座α星，视差大约是0.76弧秒，因此它的距离是太阳的27万倍，即40亿千米。这个数字太大，也不便于书写，因此天文学家定义了一种更大的单位——光年或秒差距（parallax second）。

光年是指光在一年中所经过的路程。如果以千米为单位来表示，光

每秒走过的距离是299,792千米，将一年所有的秒数（大约是3,160,000秒）乘以这个数，得出的就是光一年走过的路程，约9.5万亿千米。

秒差距是指视差等于1弧秒的距离。实际上，任何一颗恒星与地球之间的距离都不会这样近。将视差除1便得到了用秒差距表示的距离。半人马座α星的距离大约是1.3秒差距。1秒差距大约是3.25光年，半人马座α星的距离大约是4.3光年。

其实最近的恒星并非半人马座α星，而是比邻星（Proxima Centauri），它比α星要近大约3%，与太阳之间的距离大约是4.17光年。比邻星是一颗能够通过望远镜观测到的10等星，距离半人马座α星大约2°多一些，与那颗亮星之间可能存在着物理联系，而且恰好对着我们，在依远近进行排序的恒星表中的第3、第4、第5颗恒星也可以通过望远镜观测到。如果在我们不知道恒星的亮度有着巨大差异的情况下，这最近的五颗恒星中，竟然有四颗是肉眼不可见的，这不免令我们感到惊讶。

恒星表中排名第六的是天空中最亮的星星——天狼星，它与地球的距离大约是8.8光年。它之所以这么亮，一部分原因是距离比较近，另一部分原因则是本身的光辉非常明亮，达到了太阳亮度的26倍。最明亮的恒星中还有四颗恒星的距离不足30光年，由近到远依次是北落师门、织女一、河鼓二、南河三。

在测量附近恒星距离的过程中，直接视差测量法是非常有效且有着重要意义的。通过这个方法大约求出了2000多颗恒星的视差。不过，随着距离的增加，这种方法的准确性逐渐降低；当距离增大到200光年之外时，地球轨道两边我们所能看见的恒星方向的变动会小到即使是最好的望远镜也无法确切观测出。如果说是因为我们选择的基线比较短，那么，我们是否可以选择更长的基线呢？如果认真研究起来，这会是一件有趣的事，天文学家在冥王星上（冥王星的轨道大约要比地球轨道宽40倍）能够通过直接视差测量法测出8000光年的路程。不过即使是如此遥远的距离，在宇宙空间中也只是微不足道的一步而已。

太阳的运动

我们需要定义一条更长的基线，这样才能方便测量更远处的恒星方向的变动情况，这也引出了一个重要问题：地球是否会将我们带到环绕太阳之外的某一个地方去呢？读者早已经知道了这个问题的答案，但为什么更长的基线还是无法用来测量更远恒星的距离这件事，却不见得人人都能想明白。

300多年前，天文学家通过长期观测，发现恒星并非静止不动，而是在空间中不停地运动着。这一结论最终由哈雷进行了证明。1718年，这位通过发现彗星而让人们熟知的天文学家观测到一种现象，从托勒密制定出恒星表以来的1500年中，有几颗亮星的位置确实发生了变化，它们的移动量大约等于月球的直径。既然恒星一直在运动，而太阳又是恒星之一，那么太阳对于周围的恒星而言也一定是处于运动之中的。

1783年，威廉·赫歇尔首先测定了太阳移动的方向。他推断，假如太阳（包括全部的行星系统在内）是沿着直线在运动，那么恒星看起来就是朝着相反的方向移动。恒星的这种“视差动”（parallactic motion）会和它们的自行混合在一起。但总的说来，在我们面前的星会从我们运动方向那一点向着四周运动，而在我们背后的星则会向着相反的一点聚集合拢。赫歇尔认为，将前面所说的那一点，也就是所谓的“太阳向点”（solar apex）放到武仙座中，这一点离天琴座中的织女一较近；而以后的研究也把这一点放在了那附近。

通过恒星的视向后运动，我们能够知道太阳的运动方向，但却无法得知太阳运动的速率。这个问题需要运用分光仪进行回答。我们知道恒星的光谱是一条彩带，上面常分布着许多暗线。根据多普勒提出且后来经过斐索（Fizeau）补充的原理可知，光谱线让我们明白恒星在视线中是如何运动的。如果光谱线向紫色一端移动，那么就是恒星相对靠近；如果光谱线向红色一端移动，则是恒星在后退。随着恒星运动速率的提高，移动的距离也会增加。

太阳系运动方向的那片区域中的恒星显然都会以最高速度靠近我们，而天空中相反方向的恒星也似乎都在以最高速度后退，与我们之间的距离越来越远。根据对恒星光谱30年的研究结果，以及由利克天文台天文学家整理出来的结果，我们对太阳运动及其运动速度有了进一步的

认识。

对于我们周围的恒星来说，太阳系向着空中十分接近武仙座O星的一点运动，运动速度大约是每秒19.8千米。对于这些恒星来说，地球是在螺旋线中运动，不只是绕着太阳运动，还促进着太阳的前进运动。

在追随太阳的运动中，地球带着我们经过比它的轨道远一倍的路程。全部的恒星向后移动的量都比它们由于地球绕着太阳运动而发生移动的量多一倍。如此算来，一个世纪就是200倍。猛然间看过去，太阳向着武仙座运动而形成的基线仿佛可以满足我们的要求，用来测量恒星之间的距离。但恒星的距离决定了视差移动，而借助于视差总量能够确定距离的大小。不过遗憾的是，我们并不清楚在平时观测到的移动中，视差移动有多少，而恒星本身的移动又有多少，故而这个方法并不能确切量度出恒星的距离。这个方法在单颗恒星中也不适用。

恒星的绝对星等

正如我们所观测到的，恒星在光度方面有着巨大的差异。如果恒星的实际亮度是相同的，也就是说，它们在相同的距离上有着同等的光明，那么天体的距离就会成为一个简单的问题了。我们先根据这个假设分析一下两颗视亮度有差异的恒星。较暗的恒星距离一定比较远，因为观测到的一光点的亮度与其距离的平方是反比关系，所以我们很容易得到与较亮的恒星相比，较暗的恒星的距离是多少。不过，我们知道恒星的亮度是不同的。我们的问题就变成下面这个：如果我们不知道一颗恒星的距离，是否能够得知它的绝对星等（absolute magnitude）。假如答案是肯定的，那么我们很容易借助绝对亮度和观测亮度之差求出恒星的距离。最近的研究结果让这种方法具备了可行性。在此之前，我们先来认识一下什么是“视星等”（apparent magnitude），什么是“绝对星等”。

大约2000多年前，古代天文学家将肉眼可以看见的恒星划分为6等，并根据恒星的亮度大小依次排序。1等星包括了20颗最明亮的星；接着是不在最明亮之列，但仍然比较显著的2等星（包括北斗七星中的六颗星星）；以此类推，一直到6等星，这是肉眼能看见的最暗的恒

星。这就是恒星的“视星等”，指的是人们观察到的星的亮度。

望远镜发明问世之后，星等的范围得以扩大，一直延伸到望远镜能够观测到的暗星。就算是暗到21等星，也可以通过2.5米的望远镜观测到。分等的方法也更为精确，两个星等之间的准确比例为2.512倍。因此1等星的亮度大约是2等星亮度的2.5倍。由于有几颗恒星的亮度太高而必须重新编等，例如织女星就成为0等星，而天空中最亮的天狼星是–1.6等星，太阳是–26.7等星……

上面讲到的是肉眼可以直接看到或者通过望远镜能够观测到的“目视星等”（visual magnitude）。如果两颗恒星的目视星等相同，但颜色却不同，那么在照相底片上通常红色星会比较暗。“照相星等”（photographic magnitude）不同于目视星等，特别是在红色星部分。此外，根据使用工具的不同，星等系统也会有所不同。

绝对星等是指1颗恒星在恰好10秒差距处，它的视差是0.1弧秒所对应的星等。这样一来，心宿二的绝对星等就是–0.4，天狼星的绝对星等是＋1.3，而太阳的绝对星等是＋4.8。就10秒差距的标准区域而言，心宿二将相当于最亮时的金星，天狼星等同于一颗1等星，而太阳则等同于一颗暗星。

通过简单的计算可以知晓，假如太阳在20秒差距之外（大约是1等星毕宿五的距离），我们以肉眼将无法看见它；假如太阳在6300秒差距或者2万光年之外（大约是武仙座球状星团一半多的距离），哪怕是用最好的望远镜也无法观测到。

如果想要测量那些超出了直接视差观测范围的天体的距离，现代采用的方法是确定天体的绝对星等。而对于确定还不知道其距离的遥远恒星的绝对星等，以我们现在所知有两种方法：一种是对恒星光谱进行特殊研究，另一种则是利用造父变星进行观测。

利用分光仪测量恒星的距离

我们所熟知的分光仪的主要用途是分析光谱，几乎没有人会把它和测量恒星的距离联系在一起。直到1914年，威尔逊山天文台的天文学家

发现，通过光谱中的某些线纹可以考察恒星的绝对星等。同时，包括这个天文台在内的多个天文台计算出数以千计的恒星的分光视差（spectroscopic parallax）。

我们在前面对光谱序进行讲述时说过，从蓝星到红星的次序变化会随着恒星表面温度逐渐降低而出现。就如铁的沸点要远远高于水的沸点一样，在不同的温度中，恒星大气中的各种化学元素能够最有效地吸收对应的特殊线纹花样。因此，花样会在光谱序中发生变化。由于同谱型的恒星表面温度几乎相等，在光谱中的线纹花样也就相差不多。

此外，压力也是一个重要条件。就如同当压力减小时（如山顶之上），水的沸点就会降低一样，当压力比较小时，化学元素也能在较低的温度下显示其光谱线。某一谱型中的恒星的表面压力如同图6–4所示，是随着恒星发光本领的升高，向着更大的恒星发展而降低。如果需要维持同一个线纹花样，温度也就要逐渐降低。因此，少见的红巨星的温度会低于主星序中的红色星。

并不是所有化学元素受到这种温度和压力调和的影响都相同，一方面因为花样相差不多，另一方面也因为线纹在增强或者减弱上的差异。这就是上述方法建立的关系基础。当我们对一个恒星光谱中的纤维的敏感程度有所了解，便能知道这颗恒星的绝对星等，从而推测出这个恒星的距离。

造父变星的距离

通过我们前面的讲述，应该很清楚造父变星是有规律性的变光星，其变光周期在几个小时到几个星期之间，主要分为星团造父变星和标准造父变星，前者的变光周期大约是12个小时，是蓝色星；而后者的变光周期大约是一个星期，是黄色超巨星。它们的变光程度大约都有1星等。随着亮度的变化，造父变星的颜色也会发生一定的变化。我们都认可它们属于脉冲星，但我们接下来要讨论的是它们的价值，这与所有涉及它们变光原因的理论没有任何关系。造父变星通过变光周期和绝对星等间确定了的关系，在研究宇宙方面有着非常重要的作用。

哈佛天文台的勒威特女士（Ms. Leavitt）在1912年首先注意到这种

关系，她在对小麦哲伦星云（我们会在下一章介绍这个由遥远的恒星聚集起来的新团）的造父变星进行研究时，发现随着造父变星的视星等的变化，变光周期也会发生变化。因为与星云到我们的距离相比，星云中的造父变星之间的距离之差要小得多。所以，这些造父变星的视星等的关系，与它们的绝对星等之间的关系相似。几年之后，夏普利（Shapley）对这种关系进行了更加透彻的研究。他画了一条曲线表示造父变星变光周期随着平均绝对星等发生的变化。平均星等（average magnitude）指的就是一颗恒星在最亮时和最暗时的平均等次。

假如造父变星的变光周期是12个小时，它的平均绝对照相星等就是0；假如变光周期是24小时，平均绝对照相星等就是–0.3；假如变光周期是10天，平均绝对照相星等就是–1.9；假如变光周期是100天，平均绝对照相星等就是–4.6。这就是夏普利描绘出的曲线中的几个例子，它们能够应用在任意位置的造父变星上，无论造父变星的距离有多远，进行计算的方法都会非常简单。首先我们需要找到一颗符合上述特点的造父变星，然后每夜持续对它进行观察，测定出它的变化周期。接着，在曲线中找出与它相当的绝对星等，再从观测中确定它的平均视星等，最后根据这两个数据计算出它的距离。

这个方法首先是需要寻找到造父变星，不过这样的造父变星并不多见，100万颗恒星中可能只存在一颗恰好符合那条曲线的标准造福变星。幸运的是，黄色造父变星是超巨星，而且属于最亮的一类恒星，即使它在遥远的地方，甚至百万光年之外，我们也能够发现。这些超巨星位于银河系中的各个部分，不仅存在于本系边缘的球状星团中，也存在于银河系之外的其他星系中。无论在什么地方寻找到造父变星，天文学家都能测量出它的距离，进而确定它所属的大团体的距离。

在确定距离这个问题上，球状星团中的造父变星同样有着重要的作用。对于造父变星中的较短周期来说，夏普利的曲线可以作为绝对星等0等处的水平线。这个值表示这一类所有的变星，要确定它们的距离甚至比前面所说的方法还简单一些。借助于造父变星以及其他确定绝对星等的方法，天文学家得以研究恒星系统以及更遥远的其他星系，而且研究的精密程度也是前人无法想象的。

恒星系统

在选择和自己一起进行长途旅行的伴侣方面，恒星与人类有些相似。有些恒星会按照自己的线路独自前行，运动速度不变，也不会受其他恒星的影响；有些恒星则成双成对地运行，或携手并肩，或相互绕转，这种情况被称为“双星”（binary star）。也有一些恒星聚集在一起，形成小群体，它们便是“聚星”（multiple star）；还有一些恒星会集结成大部队，这就是“星团”（cluster）。然而，无论恒星是以独行侠的姿态游走，还是结伴同行，它们始终都被包含在星辰社会中的各个区域内，即所谓的“星云”（nebula）或“星系”（galaxy）。天体的主要特征正是群居，接下来我们就对恒星聚集成的各种系统进行一番研究。

目视双星

北斗七星的勺柄中间有一颗恒星叫作开阳（Mizar），这是一颗著名的双星。即便是通过较小型的望远镜，也会发现它有两颗亮度不同的恒星。这一情况早在1650年就有了相关记录。此后，又出现了一些用肉眼看是一颗，但通过望远镜观测才发现是两颗星星的情况。不过，当时并没有人去深究这种情况发生的原因，也几乎没有人对此关注。当然，我们可以想象，在天空中的许多星星中，常存在两颗相距很远却几乎位于同一方向的星星，所以看起来像是一颗。不过，我们通过计算得知，这种“光学双星”（optical binary）与观测到的双星相比而言非常少。因此，许多双星可能真的是连在一起，而非我们眼睛的错觉。双星之间的角度越小，它们之间存在物理联系的概率就越大。通过望远镜观测到的双星被称为“目视双星”（visual binary）。

多数目视双星都并排运行，少有相互绕转着运行的情形。其他星系却存在着相互绕转的情况，如地球和太阳，但它们之间的距离和旋转周期都要大很多。小马座（Equuleus）中的δ星就是以不到6年的最短周期闻名，它的两颗恒星之间的距离要小于木星到太阳的距离。半人马座的α星也是其他旋转系统的例子，周期大约是80年，两者之间的平均距离

要大于天王星到太阳的距离。还有北河二，双星相互绕转的周期大约是300年，两者间的平均距离大约是冥王星到太阳距离的两倍。事实上，北河二是最早被发现具有绕转特征的双星。1803年，威廉·赫歇尔就发现了两颗恒星之间的连线，根据100多年前布拉德利的记载可知，它们的运动方向确实发生了改变。这个发现有着非常重要的意义，因为先前的天文学家——包括赫歇尔在内——都仅仅把通过望远镜发现的双星看作视双星，直到此时才发现，其中有一些是实际的物理系统。也就是说，从此以后，天文学家开始寻找和研究目视双星，并不停地扩展这项工作的范围，一直延伸到南天极区域，那里是早期观测者无法全面观测的地方。

利克天文台的艾特肯（Aitken）是公认的研究目视双星的权威人士，他对通过望远镜能够观测到的9等以上的所有恒星进行了仔细的研究。他独立担负了这项工作的大部分内容，到1915年时，已经完成了对4300颗目视双星的观测。1932年，艾特肯发表了距离北极120°以内的区域中的已知目视双星表，其中包括17000多颗目视双星，他推测平均18颗9等星之上的恒星中就有一颗双星，而且对南天的观测同样符合这个推论。

在用望远镜对双星进行观测时，通常要用测微计（micrometer）替换目镜。测微计中有一蛛网，可以在移动的视野中保持自身的平行，也可以旋转，都是使用精密的标尺做量定的。在观测过程中，通过测微计测量出两颗星星的分离角度和比较暗的星星（较亮星的伴星）的方向。当伴星绕转一整圈或绕转的路程已足以表示其余之后，就可以开始计算轨道的长度。相对轨道包含了七个要素，如大小、偏心率、交角等，接下来就可以测定其轨道。但是根据这些，常常无法得知对着我们的是轨道的哪一边。这些轨道相对于天空平面的交角是不同的，大致说来，它们都是比行星的公转轨道要扁一些的椭圆形。

大犬座中的天狼星和小犬座中的南河三是所有目视双星中最值得关注的，它们都是距离我们比较近的恒星，与我们的距离分别是约8.8光年和10.4光年，存在着明显的恒星间的运动。许多年前，天文学家就发现这两颗恒星的运行路线不是单独星所具有的直线，而是波浪状的曲线，这表示它们都拥有一颗比较暗的伴星，一边绕着它们旋转，一边向前运

行。就如海王星或冥王星一样，在还没有发现这两颗星的暗伴星之前，人们就已经知道它们的存在了。1862年，通过望远镜第一次观测到了天狼星的伴星；而南河三的伴星直到1896年才被发现。

分光双星

正如很多用肉眼看来是一颗恒星，而通过望远镜观测才发现是两颗一样，还有许多星星，就算用最好的望远镜观测也只是一颗，但分光仪却可以将它分开。除非绕行的轨道平面对着我们，否则那颗恒星会有时靠我们很近，有时又距离我们非常远。当恒星靠近我们时，光谱中的线纹会向紫色一端移动；当它远离我们时，线纹又移向红色一端。这种现象就是著名的多普勒效应。假如不能用地球公转来解释一颗恒星光谱中的线纹有规律地来回移动，那么这颗恒星就会被归为“分光双星”（spectroscopic binary）一类；而往返移动的周期就是双星的回转周期。假如伴星也有相同的亮度，它的线纹也会出现在光谱中。假如两颗恒星属于同一谱型，那么光谱中会出现以相反的情况来回移动的相似花样，所以当它们两者相重叠的时候，线纹有时是双的，有时却是单的。

我们在前文中提到的北斗七星中的开阳是一颗奇特的星，它既是目视双星中第一颗被发现的恒星，又是第一颗被发现的分光双星。1889年，哈佛天文台首先观察到，这对目视双星中较亮一颗的光谱在一些照片中是重复的，而在另一些照片中又是单独的。不过，通过望远镜无法将这两颗星区分开来。它们相互绕行一周的周期大约是20.5日，它们之间的平均距离略大于天王星到太阳之间的距离。

天文学家同时还找到了1000多颗分光双星，其中有几颗非常明亮的恒星，如五车二、角宿一、北河二等。五车二由两颗亮度相似的黄色星组成，周期大约是102日。角宿一由两颗相距比较近的蓝色星组成，它们的旋转速度分别是每秒130千米和每秒210千米，周期大约是4天。通过望远镜观测到的北河二的一对星，每颗都是分光双星，肉眼看起来是一颗星，实际上却是四颗星。这种双星变化多端，有的几乎相连，周期仅有几个小时；有的好几个月才能旋转一周，通过未来的大型望远镜观测，它们可能成为目视双星。

有许多双星的光谱中，有三条暗线不会随着其他线纹移动，这些就是夫琅和费光谱线中紫色部分的H钙线和K钙线，以及黄色部分的双D钠线。有些人认为在星光来到地球的过程中，空间中的极稀薄气体将这些暗线吸收了。

双星的数量是非常庞大的，大约每四颗恒星中就存在一颗双星或聚星。一些天文学家甚至认为，像太阳这样的单个恒星是非常少见的。在我们对恒星的本质有了完美的认识之后，可能就会明白为什么会有如此多的双星。双星形成的分体学说被大家广泛关注，这个学说指出，在高速旋转的影响下，一颗恒星会分离成两颗。甄思还提出，造父双星的脉动也是在分离过程中形成的。当两颗恒星分体之后会成为距离接近的分光双星。在浪潮的引力下，双星的分离程度和旋转周期会加快，但不一定能够增加到目视双星那样远。

对于这些观点，我们先不做定论，双星系统最主要的价值是可以测量出恒星的质量，而且目视双星在这方面的计算方法非常简单。我们用以秒为单位的视差的立方乘以以年为单位的周期的平方，然后除以以弧秒为单位的两颗恒星间的平均距离的立方，这样就能得到两颗恒星的质量之和。不过，这种质量的单位只能用太阳质量来表示。我们在前文说过，单个恒星的质量与太阳的质量相差不大，假如我们把太阳的质量当作双星质量之和（根据双星的种类有所增减），然后计算出双星的视差（又被称为力学视差），就可以得出相当精确的距离。

食双星

当分光双星以轨道边对着我们，或两颗星之间的距离非常近时，就被称为“食双星”（eclipsing　binary）或“食变星”。在这一大群中最先被发现也最著名的食双星是英仙座中的大陵五，这颗恒星又有“妖星”之称。大陵五的变光周期非常准确，约为2日21小时。在两天多的时间中，大陵五的亮度并没有太大变化，只有通过十分精密的测量才能发现其微小的变动。在接下来的5个小时内，大陵五会慢慢暗下来，最暗时大约只有平时亮度的1/3。在此后的5个小时内，它又逐渐恢复到原有的亮度。

在大陵五的变光出现显著变化的10个小时内，这颗亮星的一部分亮度其实是被伴星食去了。我们明白这是偏食现象，因为紧接着它的亮度又会衰弱。如果是全食的话，光在全食时期会保持最低亮度；如果是环食的话，也就是说，如果前面的恒星完全投影在后面恒星的圆面上但又不会将后者完全遮盖住的话，则会出现最低的光度，而光的衰弱和恢复有着不同的性质。在其他的食双星中，有些会出现全食，有些则会出现食蚀。

在两食相隔的期间，光并不是长期不变的，有时候变化会非常显著，特别是当亮星食去约一半暗星的时候。除了食的变化外，两星也会变得不再呈球形。一方面，它们会因自传导致两极呈现扁状；另一方面，它们也会因相互绕转而呈现出波浪的长形。

在食双星的变光过程中，不仅要准确测量出它的光度，还要测量它的光谱，这样就能知道这两颗恒星的特征及其轨道的情况。这样算出的恒星大小和恒星形状数据是最具有参考价值的数据。除了大陵五之外，在肉眼能够看见的亮星中，属于食双星且变化程度比较大的有天琴座中的β星、金牛座中的λ星、武仙座中的U星以及天秤座中的δ星。

在分光双星中，蚀星系是一种特殊情况，它们的轨道大部分是以边对着我们。如果从恒星系统的其他部分来看，这些恒星是没有任何变化的，而其他我们观察不到变化的相近双星却会因为交蚀而出现变光。

星团

星团并不是星辰在天界中的偶尔聚集，而是很有秩序地在天空中运行的星群，主要分为两类：一类是“疏散星团”（open cluster），或者称为“银河星团”（galactic cluster），因为它们都位于银河系中；另一类则是“球状星团”（globular cluster）。

在距离我们比较近的几个星团中，肉眼可以看见其中最明亮的恒星，如昴星团，又叫“七姐妹”。在秋冬季的夜空中，这是7颗肉眼能够观测到的、呈短把勺子形的恒星。如果观测者仔细观察的话，甚至能够从这个星团中看出九颗或十颗星星，通过望远镜观测到的就更多了。昴星团的南边又有一个显著的疏散星团，属于金牛座，那就是毕宿星团。

这个星团可以引领我们找到天牛的头部V形，其中还有明亮的红色星毕宿五，尽管这颗亮星还没有被确定为这个星团的成员。

疏散星团中的成员在空间中的运动都具有一致性，有些星团的距离比较近，所以容易观测到它们的运动，这一类星团又被称为“移动星团”（moving cluster），毕宿星团就是一个典型。这个V形星群（毕宿五除外）及其附近的星都在一致地向东运动，它们的运动路线虽然不是完全平行的，但远远望去也好像是在沿着许多条道路向远方汇聚，这表明它们还在退后。约在一百万年前，这个星团与我们的距离大约是65光年，而现在的距离已经增加了一倍。或许亿年之后，这个星团会距离我们更远，直到成为望远镜中的一个暗淡天体，去到距离猎户座中的红星参宿四比较近的位置。

我们现在也正被移动星团包围，但太阳并不是其中的成员。这个星团中的一部分出现在北天，形成北斗，但需要去掉勺柄末端的一颗星和指极星上方的一颗星。南天中是天狼星，还有一些散布得比较远的亮星，它们都是这个移动星团中的成员。经过很长一段时间之后，它们会将我们远远甩在后面，成为平常状况的疏散星团。

有些疏散星团，用我们肉眼看起来像是一块雾斑，被称为“蜂巢”的鬼宿星团便是一个典型的例子。鬼宿星团属于黄道带中的巨蟹座，在狮子座中的镰刀形附近。通过望远镜就能观测到这些暗淡光斑是一个粗略的星团。另一块云状光斑位于银河中，它属于英仙座，距离仙后的宝座比较近。就算是用小型望远镜也能发现那里存在着两个星团，这就是著名的英仙座双星团。我们用望远镜顺着银河观测，还能发现其他一些美丽的疏散星团。我们或许可以想象，这些星团中比较近的星看起来依然远在银河之外。不过，狮子座和牧夫座之间的后发座星团也在银河北极附近。

在对疏散星团进行观测时，对测量远近有重要价值的造父变星和星团变星却没有在其中被发现。实际上，在这类星团中也没有观察到其他任何变星。因此，天文学家想出了其他方法，以测量这些星团的距离。利克天文台的特朗普勒（Trumpler）测出了100多个星团的距离和范围。令人诧异的是，随着这些星团与地球间距离的增加，它们的直径也

变得更大了。

我们需要对这类事实产生的结果进行解释，对于地球能使这些星团围绕着它整齐排列起来这一点，我们似乎不太相信。这种大小的变化，或许能够归纳到观测或者计算的特殊情况中。在对星团的距离进行测量时，天文学家认为空间是完全透明的，假设其中填充了稀薄的大气，那么远处的星团透过这些介质看起来就会比较暗淡，因此也就显得比真实的距离更远一些。如果填补星团形成的角度，星团看起来就会大很多，因此修正的结果是一定要使遥远的星团变得更大。

在解释疏散星团的观测距离一直在增大这个问题时，特朗普勒假设银河平面覆盖着一层有好几百光年厚的吸附物质。对于远在3000光年之外的一个恒星来说，完全透过吸收层观测它时，它的亮度大约会降低一半。对于距离银河比较远的天体来说，这种吸收层产生不了什么不利影响。但对聚集在银河平面的疏散星团来说，影响就比较大了。因此，那些构成银河的星云必然会受到重要影响。当我们透过这层雾状介质进行观测时，它们看起来非常暗淡，也显得比真实距离远很多。于是，整个银河系的直径从通常认知中的约20万光年缩短到了三四万光年。这就是特朗普勒对疏散星团进行研究后得出的结论，但这个结论的正确性还有待商榷和论证。

球状星团

在第二类星团中包含了一些体积比较大并且非常壮观的球状星团。它们远离了银河中的积聚区域，处于太阳系的边缘，这里的星原本就非常少，已知的有121个星团，其中10个位于麦哲伦云中。

在所有的球状星团中，半人马座ω星团和杜鹃座47号星团（47 Tucana）是最亮且最近的星团，但在北纬中部的观测者无法看见它们。它们的距离大约是2.2万光年，形成云状的4等星，因此肉眼就可以直接观测。通过望远镜能够发现，它们是由许多恒星聚集在一起形成的扁球形，这说明它们一直在旋转，两极如地球一样略扁。通过长时间曝光的照片显示，它们由几千颗恒星组成，但由于中间部分非常密集，所以不太可能准确计算出它们的数目。

在北纬中部的观测者，通过望远镜能够观测到武仙座大星团M13。这是一个非常美丽的球状星团，它大约会在傍晚时分从头顶上方经过。如果我们将武仙座视为一只蝴蝶，这个星团就位于蝴蝶头部到北翼的2/3处。在观测条件最合适时，几乎用肉眼就可以看见它，只不过通过望远镜观测，尤其是在拍下来的照片中，这一星团会更为壮观。

这个星团与我们之间的距离大约是3.4万光年，因此只能看见其中比较亮的恒星。如果星团中的恒星亮度不如太阳的话，哪怕是通过最大的望远镜也无法观测到。不过，目前已知可以观测到的恒星大约是5万颗，比肉眼所能看见的整个天空中的星星多出20倍。武仙座星团中有数十万颗以上的星，最密的部分直径大约30光年，星团中大部分恒星都在星团直径70光年的范围内。在星团中与太阳周围相似的空间里，恒星的数量要多得多。假如我们身处这个星团的中心，一定会发现天空中的星座要比我们现在能看到的亮很多倍。

夏普利在威尔逊山和哈佛天文台对球状星团进行研究的结果，大致确定了它们的距离，约在2.2万光年到18.5光年之间。这些星团已不在银河中央平面，而是很均匀地分布在两边，这表明其与星云系统有着密切关联。球状星团分布在直径约20万光年的空间范围内，空间的中心距离地球大约是5万光年，正好与人马座所在的方向相同。假如我们设定是这些星团组成了银河系的轮廓，那么这个系统的直径大约就是20万光年，中心恰好在人马座的方向，在距离我们5万光年外的地方。

银河中的恒星星云

在夏末秋初的傍晚，北纬中部的观测者能够看见银河最美丽的模样，它从东北一直延伸到西南，像是一条发光的带子横过中天。在晴朗无月的夜晚，可以在没有人工光源干扰的地方进行观测，那是肉眼所能看见的最动人的天界风景之一。

我们从东北方的地平线沿着银河溯流而上，经过英仙座、仙后座、仙王座后，接着便到了我们熟悉的北方大十字区（天鹅座），在秋初的傍晚，这里是已接近天顶的地方。银河在这里分为两个支流平行往下，一直分支到南十字座。这种分支的现象并非银河真的发生了分裂，而是

一些黑暗的宇宙尘云遮住了外面的一些恒星，我们将在后面详细介绍这种情况。

银河西支流到了天鹅座南部就变得越来越暗，但在快要接近地平线时又逐渐明亮起来；东支流则在经过天鹰座时变得更加明亮，经过天鹰座后慢慢聚集成壮观的盾牌座（Scutum）和人马座星云。这个区域与在其附近的蛇夫座和天蝎座都是最引人注目的银河区，无论是用肉眼还是通过望远镜都能观测到。通过短焦距望远镜拍到的照片，可以清晰展示这里的情况。巴纳德为此处拍摄的照片非常美丽，在北纬中部能够观测到的银河的其他部分也同样美丽。巴纳德用25厘米的布鲁斯望远镜在威尔逊山拍摄了一部分照片，又在叶凯士天文台完成了其余部分的工作。

银河在南方地平线之下，经过半人马座，两个分支在这里合为一支，又经过了南十字座，这里是距离天球南极最近的地方。此后再往北流去，在我们的冬季天空呈现出一条宽阔的河流。这部分银河的亮度没有夏季看见的部分高，而且也没有显著聚集起来的星云。农历的11月份，这部分银河首先经过两颗犬星和猎户座，再经过双子座和御夫座（接近天顶），最后进入英仙座。

在银河中，我们可以见到银河系的星云在天空中形成一圈投影。显然，这个发光地带中心的圆圈显示了扁平系统的主要平面。我们需要借助这个投影完整地绘制出该系统的样貌。在后面的内容中，我们将会详细介绍绘制此图的发展情况，以及天文学家们跨越这个系统对疆界以外的星系的探索和研究。

无论是明亮的星云还是暗淡的星云，在银河系中都有着举足轻重的地位。当然，最容易引起我们注意的还是银河系中的星云。

星云

从前，除了银河系中的星云，天空中所有的暗淡光斑也被称为星云，其中一些用肉眼就能直接看到，通过望远镜观测时又发现了更多星云。在寻找和研究星云，以及对其进行记录、编排等工作中，赫歇尔家

族的一些天文学家，如约翰·赫歇尔、威廉·赫歇尔以及卡罗琳·赫歇尔女士等，都做出了杰出的贡献。

有些星云拥有独特的名称，如猎户座大星云、北美洲星云、三叶星云（Trifid Nebula）等。以发现过许多彗星而为人所知的梅西耶制作出来的103星云表中的编号，常被用来命名明亮的星云。如果观测者使用小型望远镜进行观测，常会误认为这些星云是彗星，例如仙女座中的M31。不过，现在采用的都是德雷尔（Dreyer）编制的新表（New General Catalogue）中的号数来表示星云了，这个表由两部分组成，里面包含着13,000多个星团和星云。仙女座中这个大星云的名称是NGC 223（新表223号）。

关于星云的本质，早期的天文学界一直有着不同的见解。康德认为，星云是遥远的星系——岛宇宙，这一见解得到了一定范围的认可；威廉·赫歇尔则认为星云与恒星有着一定的区别，星云是一种发光的流体；拉普拉斯提出了著名的星云假说，他认为是一团气体星云凝缩在一起形成了太阳系。不过，通过大型望远镜进行观测的结果显示，星云是气体的说法并不正确。经过分析发现，许多星云都是由恒星构成的。19世纪中叶，罗斯爵士以当时最大，也是往后许多年中最大的1.8米反射望远镜非常有效地把大家认为的“星云”的云，显露为遥远的聚集在一起的恒星。

不过，并不是所有星云都由恒星聚集而成。美国的哈金斯（Huggins）是将分光仪应用到天文学中的先驱者，他验证了赫歇尔提出的“星云是发光的流体”这一说法的真实性。1864年，哈金斯用分光仪对天龙座中的星云进行了仔细的研究，并观测到一种明线的花样，而这正是一种发光气体形成的光谱。现在，我们已经知道一些星云是气体状态的了。不过，还有一些星云拥有与恒星光谱相似的暗纹花样，但却不能解释这是恒星团形成的痕迹。星云中依然包含着很多尚未发现的秘密。

我们现在已经能够对银河系中的星团与星云进行区分了。此外，最近的研究也表明，很多从前认为是星云的天体，其实是在银河系之外的遥远星系。严格说来，银河系和银河系之外的星云都可以被分为明的和

暗的弥漫星云、行星状星云两类。

明亮的弥漫星云

猎户座大星云是所有明亮的弥漫星云中最著名的星云。通过肉眼可以观测到，它是组成猎户佩刀形三星的中间那颗，位于组成腰带形较亮的三颗星的稍南方。通过望远镜可以观测到，它是一个能够发出微弱光芒的粗略三角形。虽然这个星云面的距离大约是满月距离的两倍，但实际上它的距离却有10光年，已经是一块巨大的星云了。用大视场透镜为猎户座拍照，并经长时间曝光后，照片中会显示出一层将猎户座中的大部分区域覆盖住的暗淡星云。

人马座中的三叶星云也是明亮的弥漫星云中的典型例子。乍看之下，它由三片或者三片以上的星云组合形成，因为星云上面有一些宽阔的黑暗裂纹。实际上，那些裂纹是由许多暗星云与明亮物质混合在一起形成的。在昴星团中，最明亮的几颗星都被星云包裹着，令这个星团的照片变得更加有趣。但是，如果离开望远镜用肉眼观察，就只能够看见少数的星。通常情况下，就算是照片中最显著的星云，也无法在最大型的望远镜中被观测到。

北美洲星云就是这样的情况，由于它的形状与北美洲地形图相似，海德堡的沃尔夫将它命名为北美洲星云。它位于天鹅座中北十字顶端的那颗亮星附近，是照片中非常引人注目的天体。在这个星座中还有一个逐渐增大的卵形环状星云，于是天文学家推测这可能是一颗恒星爆炸引发的结果。假如这种推测是正确的，并且恒星的膨胀率始终没有变动的话，那么这颗新星的强烈爆炸应该发生在10万余年前。这个环状星云中最亮的部分被称为网状星云和丝状星云，它们的组成结构与其名称相互对应。

上面讲到的这些都是明亮的弥漫星云，通过望远镜，尤其是在长时间曝光的照片中，都发现了许多与之相似的星云。不仅在银河系及其附近有着这些明亮的弥漫星云，银河系之外也有很多。实际上，在这类星云中已知的最大星云——大麦哲伦云，就位于银河系之外。大麦哲伦云又被称为剑鱼座30号（Dorado 30），直径大约在100光年以上。

弥漫星云是由气体和微尘组成的巨大云状物，它们在许多方面的特征都能让我们联想到彗星的膜状尾巴。星云中物质散布的稀薄程度要小于实验室中所能得到的最好的真空密度。只不过星云的云层非常厚，因此它们才能被我们看到。如果我们身处北美洲星云中，那么基本就不能感觉到它的存在了。

星云的光

我们一直没有想清楚，是什么让这些星云发光，它们这样稀薄的物质应该无法达到发光的温度。在很长一段时间内，天文学家一直被这个问题所困扰，直到哈勃利用威尔逊山的大反射镜对星云进行细致研究后，才得出了答案。他发现，星云的光芒是借助了附近的恒星。差不多每种星云的发光都是由邻近或其中的恒星在发挥作用，而且恒星的亮度越高，它所接近的云状光芒的范围就会越大。不过，星云的光芒并非只是简单地受到星光的影响，至少有些星云并不是这样。

通过分光仪对星云进行研究，天文学家发现了它的光与相关恒星之间存在的有趣关系。所有恒星（除了最热的）附近的星云光都与星光类似。两者的光谱中都有相同的暗线，花样也相同。昴星团附近的星云就具有这样显著的特征，不过猎户座大星云以及其他与最热恒星相连的星云的光芒又与此有着较大的区别，它们的光谱中存在着明线花样，这与恒星光谱是不同的，这种区别又是什么原因所致呢？

关于第一类星云的光的来源，天文学界存在着不同的看法，一些天文学家认为，星云的光就是星光的反射。不过，第二类有明线花样光谱的星云中的光，显然就不是星光了，但与其相关的恒星依然起到了照明的作用。这让我们联想到极光，极光也不是反射太阳光形成的，彗星的光也是这样，因此我们可以得出结论，猎户座大星云以及相似星云的发光，很可能和极光相类似，是受到了附近热度很高的星的影响。

在很长一段时间内，科学家都难以解释星云光谱中的明线花样。在这些线中，有些是确定的、我们所熟知的氢氦元素，它们并没有神秘之处。不过，星云光谱中还有一些明线是在实验室中从来没有出现过的。这是否可以说明，星云中存在着地球上没有发现过的元素呢？这种元素

被研究者暂时命名为“⿹气云”（nebulium），就像以前将太阳的主要组成气体命名为氦一样，因为氦元素首先是在太阳光谱中被发现的，后来证实了地球上也存在这种元素。不过，⿹气云很可能并不是一种元素。在星云的光谱中，这种令人感到困惑的明线是由一般的氧氮元素在这个地方的特殊情况中产生的，实验室绝对无法复制出这种情况。关于明线的问题，算是用这样的理由得到了解决。

行星状星云

行星状星云和行星并没有直接的关系，甚至毫无相同之处。之所以有这样的名称，是因为在望远镜中观测到的行星状星云都呈椭圆面。它们是扁长的球形星云物质，比行星大得多，甚至比整个太阳系更大。它们的自转是造成扁状的主要原因，通过分光仪观测可以证明这一点。确实，也有一些行星状星云呈现出真正的圆形面，但它们的自转轴显然对着地球，而其自转周期可能要以千万年计。

现在已经发现了1000多个行星状星云，它们的大小相似，但由于远近不同，所以看起来就有了大小的差别。最近的行星状星云可能是宝瓶座中的螺旋星云NGC 7293，看起来比满月的1/3大些。而最远的行星状星云，即使通过望远镜观测也难以将其与恒星区分开，但分光仪的应用却可以轻松将它们辨认出来。

行星状星云表面的明暗不同使得它们具备了各自不同的特征，大熊座中的“枭星云”是最近的一个星云，因此也是用望远镜观测时看到的最大的星云，“枭星云”得名于它的两块仿佛枭的两只眼睛的黑色区域。狐狸座中的“哑铃星云”则是由于椭圆形的两端常常较暗淡，看起来像是哑铃而得名。有一个行星状星云有些像土星及其光环，并且对着我们的几乎总是光环的边。还有一些行星状星云拥有同一个中心的环，还有一些拥有厚环，由于圆面中心被遮住了，因此看上去比较暗淡。

通过中型望远镜观测到的天琴座中的环状星云是非常美丽的行星状星云。它位于天琴座南部，在蚀变星β及其相邻的γ星之间，但肉眼和小型望远镜都无法观测到。如果用一些大型的观测工具，便会发现它像一

块比较扁的发光的小饼。这道环在照片中呈现出较为复杂而细致的结构，中心还有一颗星，而这颗中央星是颗很蓝的天体，几乎显现出了全部行星状星云的特征，并且很显然是这些行星状星云的光的主要来源。

我们现在还没有足够的知识来解释行星状星云与其他天体间的关系，只能假想它们可能与新星有着许多的相似之处。新星和行星状星云一样，都在向银河的方向集中运动。新星的最后阶段类似于行星状星云的中央星，有些新星的周围也会被气体包裹。1918年爆发的天鹰座新星，其周围就有一层云状外壳，这层外壳以每日8000万千米的速度膨胀。

暗星云

正如我们在前文讲述的那样，星云的光来源于相邻恒星的光芒。如果没有亮星，星云就会变得暗淡无光，由于它们遮挡住了明亮的天界，所以我们才能看见它们。银河系中的明亮星云也是如此，这些黑暗尘云也在银河系的某些部分强烈聚集。这种分布非常奇妙，因为有银河系这道明亮带子的衬托，我们才能够清楚地看见它们。

在银河中，最明显的是一大道黑暗裂纹形成的“空白地带”，大约从北十字发端一直到南十字终结，将整个银河系的1/3隔成了两条平行的支流。北十字的北方有一道显著的横向裂纹。南十字附近有一块黑色物质，大小与南十字相似，但仅仅能观测到很少的星。很久之前，这个明亮星云中的大洞便得名“煤袋”，据说是古时的水手想出来的名字。

一直到20世纪30年代，大家还是认为银河系中的黑暗部分是空隙，觉得通过这个空隙能够观测到银河系以外的黑暗空间。这种说法显然难以令人满意。假如星云非常厚，这些空隙就会变成地道。那么这些地道为什么要对着地球？这很难解释。而且地道周围的星群都在向不同的方向运动，为什么这些地道却不会移动？于是，有人开始推测这些裂纹是黑暗尘云，叶凯士天文台的巴纳德就是其中之一。

如果想要了解暗云的众多数量及其复杂的形状，只需要研究那些并不难获得且非常精美的银河照片就可以了。银河处处是吸引人去探索的风景，特别是蛇夫座所在的区域内，排列着一些让人难以想象的形状。

这种暗云大部分都在银河系中，与地球的距离大约是几千光年。不过，银河之外的星系中也存在暗云，我们将在后面对其进行详细介绍。

暗星云和亮星云都是由气体和尘埃组成的大云状物，它们也许还含有较大的固体块状物。彗星和流星的结构也非常相似，因此有人认为，环绕太阳的彗星和流星就是太阳系在几百万年前经过某块暗云时顺道带来的物质。

1 热电偶（thermocouple）是温度测量仪表中常用的测温元件，它直接测量温度，并把温度信号转换成热电动势信号，通过电气仪表（二次仪表）转换成被测介质的温度。——编译者注

第七章 星系和宇宙

银河系

我们在前文已经对星云进行过介绍，如人马座大星云，其中心与我们的距离超过了5万光年，还有比较近的盾牌座星云。按照夏普利的观点，这些星云都是“星系”，也就是说，这些都是恒星或者星云聚集起来的集团。它们的平均直径大约为1万光年，有的小一些，有的大一些，有的直径甚至达到三四倍之巨。

太阳所在的星系是银河系，这是一个中等大小的特别扁的集团，其中包括我们肉眼所能见到的明亮星星、中型望远镜能观测到的几百万颗星星的大部分、许多疏散星团以及沿银河密集排列的所有明暗星云。在星系群的其他部分来看，银河系也是其中的一个星云。在银河系中，太阳仅仅是2000多亿颗恒星中普普通通的一员，而且并不是银河系的中心，真正的中心是在300光年之外的南天星座船底座（Carina）的方向。

这些星云在我们称之为银河系的超级系统中，几乎聚集在一起形成了一个平面。在过去的200多年里，天文学家曾经想精确地测量出银河系的大小和形状。银河系的主要特点就是我们观测到的空中投影的银河。这是一件很不容易做到的事，因为我们就身处银河系中，如果我们能够站在银河系之外，那测量将会简单很多。这个难题在以前表现得更为严重，因为当时丝毫不知道如何测定比环绕着我们的天体更远的天体距离。

在确定银河系的构造方面，通常有两种方法可以选择，第一种是计算天空中若干个大小相同区域中的星的数目，构成统计中的数据。威廉·赫歇尔爵士是最先使用这种方法的人，他借助望远镜仔细计算了天空中3000多个区域的星的数目。先设定某个方向的星的数目比较多，那么这个方向的星的范围就会比较广，赫歇尔据此得出结论：银河系的形状与

磨盘相似，其主轴和银河平面成直角，按当时的比例尺折算，直径大约是6000光年。然而，由于赫歇尔当年使用的仅是48厘米反射望远镜，因此只能观测到近处的星，而无法观察到比较远的星。不过，这是第一次有计划、有目的地对银河进行考察。此后的研究也多次应用到这种统计方法，在望远镜升级换代以及统计方法进一步完善之后，现在这种计算主要用于分析天空代表区域的照片上。最近的研究成果是威尔逊山天文台的西尔斯（Seares）在1928年宣布的。

第二种确定银河系的构造方法，是测定银河系中各处物体之间的距离。显然，如果我们对银河系中各处的方向和距离都能清楚掌握，就可以建立一个模型，用来表示银河系的形状和大小。我们已经知道，无论在什么地方发现了造父变星，都能较为容易地测出它的距离；而且这种具有参考价值的变星在整个银河系中分布得很广。借助造父变星和一些新的测量方法，天文学界对银河系的考察工作正进行得如火如荼，哈佛天文台及其他许多天文台都在参与。我们对银河系的形状和大小已经有了一定的了解，但大家的意见还没有完全统一，存在着一些分歧。

我们在前文提到过，球状星团有一个可靠的模型，在银河平面上，这些星团对称分布，包围起来的空间直径大约在20万光年以上。假如球状星团就是银河系的轮廓，那么银河系的直径就有20万光年，其中心位于人马座大星云方向。

由于银河系外的许多星系都呈旋涡状，因此我们很容易想象银河系大抵也是如此。如果这样认定了，那么旋涡分支和中核的连接处就是人马座星云，太阳系只是一个分支中的较小集团，位于中心和边缘之间。

通过观测发现，银河系和遥远的旋涡星云都在旋转。既然我们身处旋转中，就会以每秒320千米的速度运动，现在位于仙王座方向。这种证据大约可以支持认为银河系是独立旋涡星系的观点。假如真是如此，那么银河系在已知星系中就是最大的，比其他最大的星系还要大出5倍，这种差距很容易让人产生怀疑。

尽管大小麦哲伦云都距离银河非常远，但与许多球状星团相比依然很近。由于它们靠近南天极，所以北纬中部的人无法看见它们从地平线上升起。大麦哲伦云的距离大约是8.6万光年，直径大约是1万光年以

上；小麦哲伦云稍远一些，大约是9.5万光年，直径是6000光年。以肉眼直接看去，它们像是天上的光斑。通过望远镜观测则会发现，它们由恒星、星团和星云组成，还有一些我们所熟悉的形状样貌。它们的大小与银河中的星云相似。如果它们在银河平面上，我们很难把它们和银河星云进行区分。它们的运动轨迹也容易让我们认为它们和银河系属于同一星系群。

在赫歇尔开始对天界进行他著名的考察研究的20年前，英国的莱特（Wright）就已经发表了一种学说，他认为这个大星系的形状像一个扁平圆盘。而哲学家康德于1755年提出了更进一步的观点，他认为星云是银河系以外的遥远星系，因此他曾将它们命名为“岛宇宙”。不过，由于当时以及在后面一段持续的时间内，人们都没有办法测量出它们的距离，因此也无法认可或否决这种观点。

除了已知的星团外，从前被称为星云的模糊物体可以非常清晰地分为两大类：第一类是向着银河一带聚集的星云，被称为“银河星云”或者真正的星云，我们在上一章已经介绍过了；第二类则是分布在整个天空中的星云，不过银河附近没有，因为暗星云和银河平面中的其他吸收物质将它们遮盖住了。这些星云就是河外星云，其中就包括了旋涡星云。

河外星系

哈佛的夏普利于1923年开始研究河外星系，他对天文学家们所熟知的NGC　6822星云进行观测后得出结论，这一星云比银河系中的任何星云都要遥远。因此，康德提出的“岛宇宙”至少有一个是成立的。NGC 6822星云与银河系之间的距离大约是62.5万光年，类似于麦哲伦云与银河系的距离。

夏普利之后，在河外星系研究方面取得进展的是赫伯尔，他成功地拍摄到了最近旋涡星云中的单颗恒星照片。赫伯尔用威尔逊山2.5米直径的望远镜为许多恒星拍摄了照片，这其中就包含造父变星。这些造父变星的距离很容易测定，同时，它们所属的旋涡星云的距离也都可以测

定。不过，这需要天文学家经常为这些旋涡星云拍照，以便测量出造父变星的运行周期。赫伯尔在采用这种方法对旋涡星云进行测定后，于1925年宣布它是银河系之外的星系。

“仙女座大星云”是旋涡星云中能为肉眼所见的最明亮的旋涡星云。在秋冬季的夜空，只要是对飞马座中的大正方形有所了解的人，都能轻易找到这个星云。我们暂且将这个大正方形想象成一个勺子，勺柄朝向东北方。这个旋涡星云就在勺柄第二颗星的东北方一点，肉眼看上去像是长长的微弱光斑呈现在天上。就算是通过望远镜也无法观测到这个星云的构造，但从拍摄的照片中能够看出来它是扁平状星云，它的边与我们有约15°的倾斜角，肉眼所见的明亮核周围包裹着暗淡的盘。仙女座旋涡星云的距离是80万光年，这是一个非常大的星系。

相邻的三角座中最近的旋涡星云M33，仅用肉眼几乎已难以看见它。这个星云与我们的距离尽管比仙女座星云近5%，但由于它的直径只有约1.5万光年，因此看起来也比较暗。三角座旋涡星云以平面对着我们，所以能清楚观测到它的构造。从核的反方向上延伸出的分支向着同一个方向，且在同一个平面上弯曲。

据推测，河外星系中大约有200万颗亮度可以通过2.5米望远镜观测到的星，其中大部分都是旋涡星云，它们的距离在约100万光年到1.5亿光年之间。旋涡星云的直径大小平均在5000光年到10000光年之间，这主要取决于它们的弯曲程度。它们对着我们的状况也有所不同，有些以边，有些以面，比如北斗七星附近的猎犬座中的旋涡星云就是以面对着我们。

当旋涡星云以边对着我们时，它们形似纺锤，主要特点是“纺锤”上有一道暗带，有时好像将“纺锤”分成了两半。旋涡星云中的这种中部暗带很容易让我们联想到银河系中的黑暗尘云，特别是长长的暗淡裂纹。当使用分光仪对其进行观察时，这些用边对着我们的旋涡星云会一直处于旋转状态，正好符合我们由其扁平而推测出来的情况。仙女座旋涡星云核的自转周期大约是1600万年。

并非所有的河外星云都是旋涡状的，有一小部分是跟麦哲伦云相似的星系。还有些“椭圆星云”也没有被分为单个的星，它们中有的盘面看

起来几乎是圆形的，有的则是扁扁的椭圆形，而最扁的星云，长轴两端被拉长得像是用边对着我们的双重凸镜。

银河系也如同单个恒星一样聚集成群，这就是本星系群。目前已知的本星系群约40个，其中包含的星系数目，有的只有几个，而有的多达上百个。在室女座附近就存在许多这样的例证。哈佛天文台最近在观测的半人马座大星系群中，就包括了一些能与仙女座大星云相提并论的巨大星系。天文学家一度认为，飞马座中的一群星系类似于本星系群。

当河外星系的存在被普遍认可之后的数年时间里，虽然我们对它们的情形已经有了一定的了解，但未知的情况依然不少。实际上，恒星所引发的所有问题在星云上也都一一出现了，正如我们周围的星都聚集于银河系一样，我们可以推测银河系和本星系群也都属于更大的系统——一个远超我们想象的超级系统。

不断被发明出来的新一代望远镜，特别是哈勃太空望远镜，为我们提供了非常大的帮助，让我们拥有了许多实际的观测资料，再也不必像前辈一样苦思冥想。

本星系群的中心是银河系，是半径约为300多万光年的空间内的星系总称，总质量大约是太阳质量的6500亿倍。也有人提出，本星系群的中心是银河系和仙女座中大星云M31的共同中心。本星系群中目前已知的成员星系和可能的成员星系大约有40个，其中包括了银河系和仙女座大星云这两个巨型旋涡星系，一个中型旋涡星系——三角座星云，一个棒旋涡星系——大麦哲伦云。本星系群属于典型的疏散群，不具备向中心聚集的趋势。只不过，有些星三五聚合在一起形成一个次群，至少有两个次群以银河系和仙女座大星云为中心。

近距离星系团的空间分布，让我们清楚知道，有一个更高一级的星系以室女星系团为中心成团，直径大约为30至75百万秒差距，包含了约50个星系团和星系群，被称为本超星系团。本星系群就是这个星系团中的一员。

膨胀的宇宙

在河外星系各种引人关注的发现中，最让人称奇的是它们远离我们的速度。我们通过研究它们的光谱，观察其光谱线的移动而得出了河外星系的远离速度。不计我们自身的运动影响，河外星系都在以极高的速度远离我们，随着距离的增加，速度也在增快。威尔逊山的天文学家也发表消息称，大熊座中的一个暗弱星系远离我们的速度大约是每秒1.1万千米。当分光仪应用到天文学观测中能够观察到更加遥远的星系时，我们所能得知的它们远去的速度就更快了。比利时的勒梅特（Lemaitre）提出了一个表示膨胀的宇宙的数学公式，这个公式表明，在这样一个构造中，远处的物体一定要以很快的速度离我们而去，如同我们观察到的河外星系的情况一样。

相信现在大多数人都对“大爆炸宇宙学”有所了解，不过当第一次听到这个说法时，不免令人有些疑惑。宇宙的无限，时间的永恒流逝，都是容易被我们理解的。但宇宙怎么会是由一点爆炸形成的？又为什么是从大爆炸开始的呢？

宇宙是自然界中所有物质的总称，宇宙学的研究对象并非某一个天体，而是整个宇宙的行为，但研究需要借助天体传达给我们的信息。宇宙学的研究是我们要根据现在的观测，对宇宙的遥远过去和长久未来进行探讨。宇宙学并不是哲学，而是与物理学有关。我们推断过去、研究现在以及预测未来的依据是什么呢？我们有两个预先设定好的“宇宙学原理”，首先就是物理定律的普遍适用性。我们发现和应用的物理定律能够适用于宇宙的任何地方、任何时间。其次，宇宙是均匀、各向同性的。这里的均匀是指大尺度上的均匀；各向同性则是指各个方向上的空间性质相同，宇宙不存在中心。首先，从其他天体上进行的大尺度观测与在地球上观测到的现象相同。其次，任何地方观测宇宙的发展与地球上观察到的发展相同。我们将坐标时间进行统一，然后在相同的时刻观测宇宙，任何地方观测到的宇宙都是一样的。通过对星系团的空间分布、射电源的空间分布以及宇宙背景辐射等方面的观测情况来推测，宇宙在大尺度上各个方向的性质确实是相同的。

在历史上曾经出现过各种各样的宇宙模型，我们简述如下：

1.牛顿静态宇宙论。在这个论说中，时间均匀地流逝，空间仅为一个空无一物的骨架。在欧几里得空间中均匀地分布着无限多的静止不动的天体。这是一个“一眼就可以看穿”的宇宙。但这个宇宙观点存在着著名的奥伯斯佯谬：假设空间是无限的，其中恒星密布；虽然恒星有生有灭，但总体看来宇宙中的恒星数密度不变；时间是无限的。这样一来，得出的结果就是，昼与夜都同样明亮，天空中各处的亮度相同。

2.等级宇宙论。在这个论说中，宇宙中的天体及其系统都有聚集在一起的趋势。不仅在小尺度上（太阳系、星团、星系、星系团等）如此，大尺度上也是一样。这个理论否定了“大尺度上宇宙均匀各向同性”这一说法，认为天体分为不同的等级和的层次，一级级逐渐升高。由于宇宙不均匀，所以奥伯斯佯谬不再存在。但是它无法解释宇宙背景辐射。

3.稳态宇宙。在这个论说中，宇宙不仅是均匀的、各向同性的，而且在时间上也非常稳定，宇宙特征在任何时候都不会发生变化。红移只是属于多普勒效应，而宇宙一直在膨胀。由于宇宙各处始终在创造物质，因此膨胀仍然保持均匀。但人们对于虚无中如何产生能量和物质仍存有疑问。

4.静态宇宙模型。这是爱因斯坦在1917年提出的学说，他将宇宙常数引入广义相对论的引力场方程中，并求出相应的解。因为爱因斯坦认为宇宙是静态的，所以他只求出了静态解：宇宙是一个封闭的三维“球面”，天体均匀地分布在球面上，这个球体的半径大约是35亿光年。然而，这与哈佛定律明显相互矛盾。宇宙常数像是画蛇添足，令爱因斯坦觉得这是自己一生中犯的最大错误。

5.膨胀的宇宙学模型。在爱因斯坦提出静态宇宙观点的同年，德西特（de Sitter）通过广义相对论引力场方程得出一个真空静态宇宙，但只要在其中加入物质，宇宙就会膨胀，就这样，他在偶然中发现了一个膨胀的宇宙学模型。1922年，弗里德曼（Fridman）又从广义相对论引力场方程中求出了另一组不同的解，每个解对应一个不同类型的宇宙。他的模型中包含了宇宙膨胀。1948年，伽莫夫提出了大爆炸宇宙学。1967年，宇宙微波背景辐射的发现，为大爆炸宇宙学模型提供了有力的

支持。现在，大爆炸宇宙学模型已经得到了广泛认可，并且被誉为标准宇宙学模型。

大爆炸宇宙学

哈勃在1929年通过星系红移和距离的关系得出一个公式：$v=H_0 1$，其中的1表示星系与我们之间的距离，H_0表示哈勃常数，而v表示天体的退行速度。由哈勃定律可以得知，天体与我们的距离越远，退行速度就越大；并且不论从哪个方向看，天体都一直在离我们远去。天体的退行速度为什么会随着距离的增加而加大呢？由于各个方向上都有这样的退行，那么我们是不是恰好就处于宇宙中心了呢？假如我们不是在宇宙中心，那么这一确定的观测事实要如何解释呢？

如果把宇宙星系想象成“分子”，它们会在膨胀中参与两种运动，一种是“分子”具有的膨胀速度，另一种是“分子”相对于流体元的无序运动速度，也称为星系的本动速度。物质分布的局部不均匀性在这个速度中得以体现，典型值是每秒500千米，通过哈勃定律得知，当距离超过20兆秒差距时，膨胀速度会大于本动速度。哈勃定律体现的是宇宙整体膨胀规律，而不是星系个体运动规律。宇宙只有在遵循哈勃定律的前提下，才能保持均匀性。

我们可以这样认为，当气球不断膨胀时，无论站在气球的哪个点上观察，其他地方都在离你远去，而且距离越远，离开的速度就越快。各个点上观察到的情况相同，没有中心。再来看另一个例子，观察一个含有葡萄干的面包，在面包膨胀的过程中，对每一粒葡萄干而言，其他葡萄干都在远离自己。而且越远的葡萄干，离去的速度越快，即面包膨胀的速度越大。所有的葡萄干看上去都是相同的，不存在中心。

上述的类比对星系退行的情况来说可以说是一种观测事实，表明真实的宇宙随着时间的推移一直在膨胀，如果往前追溯，时间越早，气球越小。那么，宇宙是从什么时候开始膨胀的呢？

1931年，比利时著名的宇宙学家、数学家、天主教神父勒梅特提

出，宇宙中所有星系最初都聚集在一起，称为原始原子，这个原始原子发生了爆炸，把所有星系都散布到空间中。虽说勒梅特并没有提出“大爆炸宇宙学”这个名称，但他关于宇宙学的最主要的思想就是大爆炸。

1948年，俄裔美国人伽莫夫将宇宙膨胀和元素形成结合在一起，为大爆炸宇宙学奠定了基础。大爆炸宇宙学提出的观点认为，大约在150亿年前宇宙发生了大爆炸，宇宙虽然是有限的，但它也是无界的。

将时间向前追溯，当宇宙尺度是如今的1%时，它的密度将达到现在的100万倍，这个密度比星系的密度还大，所以星系无法存在。由此可以推断出，在某个时间之前，宇宙结构是不存在的，它是演化的产物。

在宇宙结构没有形成之前，它是一大片由微观粒子组成的均匀气体，温度极高，且越是早期温度越高，密度也越大。当温度超过10^4K时，粒子的热运动能量太高，因此中性原子无法形成。温度约3000K时中性原子才能形成。电子和原子核在温度低于3000K时，会结合起来形成中性原子，大量散射光子的电子会消失。宇宙中损失了大量电子，因此光子不再受到电子的强烈散射。于是宇宙逐渐变得透明起来，光子和物质丧失了耦合机会，而宇宙介质则被作为独立的部分保留下来，我们能看到最早的宇宙，就是指已成为历史遗迹的2.7K背景辐射光子。

当温度大于10^{10}K时，粒子的热碰撞致使原子核破裂。也就是说，原子核也是在演化过程中形成的。现在观测到的1/4的氦丰度，都来源于早期原子核的合成。

标准宇宙模型表

时间	温度	时期	事件
0	无穷大	奇点	大爆炸
10^{-43} 秒	1038	普朗克时期	粒子产生
10^{-36} 秒	1038	大统一时期	重子对称形式
10^{-6} 秒	1013	强子时期	质子、反质子湮没
1 秒	1010	轻子时期	正电子、电子湮没
3 秒	109	原初核合成时期	氦和氘形成
3×10^{5} 年	3×10^{3}	解耦时期	宇宙透明化

表7–1 标准宇宙模型表

标准宇宙的困难

标准宇宙模型的说服力虽然很强，也符合观测到的事实。然而，它依然存在几个根本性的难题，其中最主要的是视野疑难、准平坦性疑难和磁单极疑难。

视野疑难

视野指的是宇宙刚刚诞生时传递出来的信号，在一定时间内走过的最远距离。这是能够彼此产生影响的空间中两个点之间的最大距离，或者说是有着因果关系的最大距离。这个距离和宇宙的年龄成正比。依照标准宇宙模型，我们可以知道大统一时代的尺度是3厘米，而此时的视野是3×10^{-26}厘米，两者相差26个量级！也就是说，在大统一时代，这个尺度范围内包括了没有因果联系的区域，并且高达（10^{26}）^{3}＝10^{78}个。

我们现在观测到的尺度范围内的物质分布差不多是均匀的。不过，世界上不会出现没有缘故的均匀，均匀是通过彼此影响而达到平衡形成的。如此，这个均匀怎么会是由10^{78}个没有因果联系的区域形成的呢？没有因果联系的区域之间无法彼此产生影响而使它们的密度相同，又怎么会令10^{78}个无因果联系的区域都有相同的密度呢？这就是视野疑难。

准平坦性疑难

宇宙早期的物质密度与临界密度非常相似，只有10^{-55}量级的偏差程度，这个偏差小到让人不可思议。

宇宙早期的物质密度为什么和临界密度如此接近呢？宇宙早期的空间性质为什么和平直空间如此接近呢？这些都是难以回答的问题。除非有特殊机制做保证，否则难以想象如此接近的情况是在偶然间形成的。

磁单极疑难

我们知道，电荷有正电荷和负电荷两种，质子带正电，而电子带负电。正负电荷之间存在一小段距离，可以组成一个电偶极。电偶极的总体是电中性的，但包含了电偶极矩。正电荷和负电荷属于电单极。尽管磁也分北极和南极，就如电荷有正负之分一样，但磁始终以偶极方式存在，从来不会出现磁单极（magnetic monopole）。这里的磁单极指的就是带有净“磁荷”的粒子，也就是磁北极或者磁南极。

20世纪30年代，狄拉克在研究电荷量子化时首次提出了“磁单极”这个词，他预言如果发现了磁单极，电荷的数量为什么总是电子电荷的整数倍就得到了合理的解释。后来，大统一理论也预言了存在磁单极。依据大统一理论的计算结果，磁单极的质量大约是质子质量的10^{15}倍，重约0.02微克。一个微观粒子的质量竟然如此之大，几乎达到了可以用宏观精密天平进行称量的程度。

磁单极几乎不会湮灭，在宇宙膨胀的过程中，磁单极会由于体积膨胀而不断增大，但密度一直在减小。现在的磁单极的密度大约是每立方厘米2×10^{-8}克，如果真是这样，应该很容易找到磁单极。然而事实是，从来就没有发现过磁单极。同时，由于磁单极的质量非常大，按照这样的计算，在宇宙中的密度大约是每立方厘米3×10^{-16}克。根据这么高的密度推算，现在的宇宙的年龄将会非常年轻，仅仅是几万年而已，这令人感觉十分荒谬。但这就是磁单极疑难。

暴胀宇宙模型

上面讲到的这些疑难，关键点都在于宇宙的膨胀速度太慢了，如果想解决这个难题，需要先找到一种能够证明宇宙在一段时间内曾迅速膨

胀过的机制。1981年，古斯（Guth）首先提出宇宙早期可能存在快速膨胀阶段，并将之称为“暴胀宇宙学”或“暴胀宇宙模型”，这个模型后来又经历了多次发展。

在大统一时期之前，宇宙处于真空对称状态。当温度下降到临界温度时，会达到对称状态向着破缺状态转化的条件，但由于存在较大的势垒，所以宇宙暂时继续对称状态。随着宇宙的膨胀，当温度低于临界温度时，破缺状态就成了真的真空。由于势垒还是较大，因此宇宙仍然保持一段时间的对称假真空状态。我们常常见到与此相似的情况，比如从气体到液态的相变中。在一个大气压下，一盒水蒸气的温度下降到100℃时，假如水蒸气足够纯净，就不会凝结成水。就算继续冷却，水蒸气依然会以低温蒸汽的气态形式存在，而不会立刻转化成水。同样的道理，当宇宙温度下降到小于临界温度时，它的真空也会停留在过冷亚稳对称状态一段时间，因此在这段时间中，宇宙的亚稳对称假真空状态的能量或者质量密度并不为零。

更形象一点的表述是，宇宙处于过冷状态，就好比0℃以下的水是过冷水一样。这个时候，粒子和辐射这两种成分在宇宙膨胀中的作用非常小，真正会造成影响的是真空状态。真空压力为负，相当于一种排斥力。换言之，在宇宙处于过冷真空状态时期，是排斥力在起主要作用。由于受到排斥力的作用，宇宙膨胀的速度会加快，这种加速度导致宇宙迅速膨胀，这就是暴胀。

暴胀阶段的指数式膨胀与标准模型中早期宇宙的膨胀规律相比是极其快速的。依据大统一理论，我们可以估算出过冷对称相的真空能量密度，由这个结果也可以得知暴胀阶段的持续时间会超过10^{-32}秒。因此，在这么短的时间内，宇宙尺度的暴胀竟然超过了10^{43}倍。

在前文我们已经详细介绍过，根据标准模型计算，与现在所观测到的尺度相对应的大统一时期的尺度要比视野大了26个量级。如今再看，那个尺度应该是高估了43个量级。换句话说，考虑到暴胀，与现在观测到的尺度相对应的大统一时期的尺度仅是视野中的组成部分中的极小一部分，因此在因果影响的范围内，视野疑难也就消失无踪了。

对于暴胀宇宙学而言，无论是在宇宙早期的无量钢密度，还是现在

的密度，都非常接近1。因此，暴胀宇宙学也提示我们，宇宙应是严格平直的，或者说应是爱因斯坦–德西特宇宙。从这个角度来看，准平坦性疑难也得到了解决。

同样的道理，由于考虑到了暴胀因素，现在所观测到的宇宙只是暴胀前破缺产生的一小部分均匀真空区域。如此，只会出现在不同真空交界处的磁单极也就难以见到，甚至几乎不存在了。故而磁单极疑难也不复存在。这似乎表明，尽管现在没有观测到磁单极，但并不表示它不存在，而是现在所观测到的宇宙范围内缺乏了磁单极生成的条件。

暴胀宇宙学借助于粒子物理中的真空相变概念，将宇宙很早期的10^{-34}至10^{-32}秒小范围内进行了修正，顺利地解决了标准宇宙学中的几大疑难，并且没有破坏标准宇宙学中的原有成果。暴胀宇宙学预言，宇宙中存在着许多非重子物质，而宇宙暗物质的主要成分或许就是非重子物质。

微波背景辐射

大爆炸宇宙论的预言

1963年年初，彭齐亚斯（Penzias）和威尔逊（Wilson）为了研究射电天文学，将一台卫星设备改装为射电望远镜。他们不断提升测量精确度，同时还尝试降低系统的噪声温度，将天线温度的测量误差降低到0.3K，进而得以观测到3.5K的宇宙背景辐射。这种辐射被确认为宇宙大爆炸时期的残骸，成为研究大爆炸理论的重要依据。在现代宇宙学上，它的发现具有非常重要的贡献，仅次于哈勃对河外星系红移现象的发现，被公认为20世纪天文学上的一项重大成就。彭齐亚斯和威尔逊也因此获得了1978年的诺贝尔物理学奖。瑞典科学院在颁奖词中指出，这项发现最根本的意义在于，它让我们得到了宇宙创生初期所留下的信息。

迪克错失发现良机

学术界对于伽莫夫、阿尔弗和赫尔曼的预言不以为然，并将预言搁置了十几年，而他们自己也没有对自己的理论进行更深入的完善，并且也对天文学观测不太重视。事实上，当时宇宙微波背景辐射痕迹已经在一些观测中得以表现，由于宇宙在复合时期残余的辐射到现在已属于射电微波波段，因此只能通过射电望远镜进行观测。20世纪40年代，射电望远镜使用的天线都很短，接收机的噪声温度很高，所以灵敏度并不高。美国麻省理工学院的迪克在1945年研制了一台射电望远镜，它的波长是1.25厘米，但抛物面天线的口径仅45厘米。迪克通过这台射电望远镜对太阳和月亮的射电辐射进行了观测。在这个波段上，地球大气也会产生辐射，并且比较强。为了排除大气辐射的影响，迪克开始精确测量1.25厘米波段上的大气辐射，却在无意中观测到温度为20K的“天空背景辐射”。他推测，这种辐射并不是地球大气造成的，而是宇宙中广泛分布的各种星系和射电辐射造成的，迪克将这种辐射称为“宇宙物质辐射”。

事实上，迪克发现的这种辐射就是后来所说的微波背景辐射，但由于当时的射电望远镜没有那么高的精确度，人们对于大爆炸宇宙模型的熟悉程度也比较低，因此迪克当时并没有把自己的发现和微波背景辐射联想到一起。更有趣的是，1946年的《物理学评论》第70卷中同时刊载了迪克关于“宇宙物质辐射”的观测结果和伽莫夫关于“核合成”的一篇论文，但20年后，这两篇文章之间存在的密切联系才被人们发现。假如伽莫夫在那时就关注并阅读过迪克的文章，就可能会将迪克的观测结果与自己预言的“宇宙微波背景辐射”联系在一起；又或者，如果迪克拜读了伽莫夫的论文,可能也会受到许多启发，进而发现3K宇宙微波背景辐射。如此，也就轮不到彭齐亚斯和威尔逊了。迪克错失了发现宇宙微波背景辐射的良机，而伽莫夫等人也失去了一次检验自己理论的时机。

迪克于1946年回到母校普林斯顿大学任教。20世纪60年代初期，迪克开始研究宇宙学，但他对于伽莫夫的大爆炸宇宙学仍然存疑。他认同的是永久振荡宇宙模型，也就是认为宇宙会周而复始地膨胀和收缩，目前宇宙正处于膨胀时期。他推测，在“振荡”（oscillation）过程中，宇宙可能留下了能够观测到的背景辐射。迪克让自己的研究生皮布尔斯对振荡模型中的宇宙温度变化情况进行计算。有趣的是，他们得出的结果显示，宇宙中充满着一种温度为10K的背景辐射。迪克在这个时刻才

想到20年前自己发现的温度为20K的“宇宙物质辐射”，进而推测这种辐射应该就是“振荡”过程中表现出来的微波背景辐射。1964年，迪克鼓励两位研究生继续对这种辐射进行深入研究，他们还为此研制了射电望远镜。但遗憾的是，他们的研究观测尚未正式开始，彭齐亚斯和威尔逊就已捷足先登，并凭此获得了诺贝尔物理学奖，迪克再次与机遇擦肩而过。

错失良机的并不只有迪克，著名的工程师、彭齐亚斯和威尔逊的同事奥姆也在宇宙微波背景辐射的发现中慢了一步。当奥姆曾经使用贝尔实验室中的喇叭状天线对宇宙进行测量时，他发现了温度为3.3K的多余噪声，并于1961年将这个测量结果发表在了《贝尔系统技术杂志》（*Bell System Technical Journal*）上。不过，由于这个多余的噪声温度比实验误差还小，而且不会对通信造成影响，所以并没有引起人们的关注。

戏剧性的发现

20世纪60年代，彭齐亚斯和威尔逊在贝尔实验室对射电天文进行研究。他们当时的任务只是调试一个为了回升卫星计划建造的6米角型反射天线，这与天文毫无关系。由于需要确定背景噪声，因此他们需要测量天线指向天顶时的天空亮度。通常情况下，用温度来表示天线测到的天空亮度，相当于这个温度下相同频率的黑体辐射的温度。彭齐亚斯和威尔逊测到的温度是6.7K，其中已知来自大气层的温度是2.3K，而天线内部欧姆损耗是0.9K，那么，剩下的3.5K噪声来源于哪里呢？

关于天线中的不明噪声，贝尔实验室中早就存在这一问题，只是一直被人们忽视。彭齐亚斯和威尔逊非常执着地想要将这个问题研究清楚，并为此花费了大量心力。由于担心是设备的问题，他们将天线拆开，果然发现里面有一窝鸽子。他们将鸽子弄走，清理掉鸽粪，但仍没有消除不明噪声。接下来的各种努力也都无法确定不明噪声源于什么地方，唯一能确定的是排除了来自于天线内部或者附近环境这两个因素。由此，他们猜测这个不明噪声是一个来自遥远地方的辐射信号，但到此时他们并没有意识到这个发现的重大意义。幸运的是，普林斯顿大学与贝尔实验室毗邻，贝尔实验室的宇宙学家们对于温度为3K的微波背景的

意义太清楚了。于是，两组人员在经过讨论之后，各自写出了一篇论文，并同步发表在天体物理学杂志上。

在宇宙学发展史上，微波背景辐射的发现无疑是最重大的事件之一，它验证了大爆炸宇宙学的预言。至此之后，我们对宇宙图像的认识越来越深刻。

宇宙的组成

地球上我们已知的同类原子组成了普通物质，而原子核中包含着质子和中子。原子核外面是高速旋转的电子，其数目等于质子数目，但原子被电离时，会有一些电子逃离原子。原子可以结合在一起成为分子，而分子又可以结合成地球上我们能看到的一切物质。由于原子可以发光，因此我们通过观测星光得知恒星的组成部分也是原子。不过，当天文学家对更大的天体进行观测，如星系外部或者星系团时，他们发现在发光气体和恒星中观测到的物质量，无法通过引力将天体束缚在一起，因此他们假定还存在一种物质，但由于太暗而不能通过辐射被我们所见，这就是暗物质。

最新观测显示，物质和能量的总密度可以用平坦宇宙所需的临界值表示。在这个总的临界值中有约1/3是物质，另2/3是暗能量，但对其本质特征并不清楚。普通物质约占总数的5%，而明亮恒星仅占0.5%。那么不在明亮恒星中的普通物质在什么地方呢？对于至少某些失踪的普通物质而言，热星系气体可能是很重要的候选者，Con–X将对这一假设进行验证。暗物质的本质更是一个难解的谜团，因为它不是由原子构成的物质。某些暗物质是由宇宙大爆炸遗留下来的中微子组成的。虽然由于它们质量的不确定性，无法确定它们占据的比例，但天体物理观测显示，中微子绝对不能说明暗物质的主要部分。大家相信其他暗物质是运动相对缓慢的粒子或者天体，又被叫作“冷暗物质”。现代天体物理未解决的重大问题之一，就是研究这种冷暗物质的本质特征。

宇宙的构成：宇宙中的物质和能量的2/3是一种未知形式的暗能

量，这种暗能量是宇宙的膨胀速度加快而非变慢的因素。对于另外1/3则以物质形式存在，其主体是暗物质，我们推测它是由宇宙诞生后早期遗留下来的运动缓慢的粒子（冷暗物质）组成的。在总量中，所有形式的普通物质仅占5%，其中只有约10%是明亮恒星，而所含的重元素（周期表中质量比较大的元素，如碳、氮、氧等）非常少。近几年的观测表明，中微子是有质量的，因此粒子暗物质的概念得以加强，在宇宙中所占的份额几乎与恒星相同。

通过引力透镜观测，我们可以对暗物质的分布状况进行研究。天文学家在对星系团中的暗物质分布或者星系周围的暗物质分布进行观测时，引力透镜都是一个极佳的帮手。在未来的10年中，用LSST和其他望远镜进行大天区星系普查，都可以绘制出超团尺度暗物质分布的透镜数据，这些数据对于研究大尺度结构的增长有着非常重要的作用。

暗物质构成的主要可能性有两种：一是宇宙创生的最初时刻留下来的基本粒子；二是恒星质量的天体，也就是大质量致密晕天体，表示为$MACHO_S$。这两种候选者的质量相差57个量级以上，是该领域中不确定性的标志。

理论学家推测，虽然$MACHO_S$非常暗，以致无法通过它们自身的辐射进行探测，但正如我们前面所讲的，引力透镜的应用弥补了这一缺陷：当$MACHO_S$经过恒星面前时，背景恒星的光会变强。十几年前，有些探测小组就独立地发现了这个现象，只是与星系相比，透镜的质量太小了，所以被称为微透镜。关于$MACHO_S$的本质，人们一直没有找到答案。它们是普通物质形成的恒星呢，还是陌生物质组成的天体呢？如果想要解决这个问题，必须准确测量出它们的质量，但就算是现在，也还无法做到这一点。最佳的推测方法是：已知$MACHO_S$的典型质量要稍微小于太阳的质量，如果能够求出被$MACHO_S$成像的恒星的视运动，通过SIM或许可以确定$MACHO_S$的质量。对于微透镜的研究有几个重要的副产品，包括分辨被透镜的恒星表面，通过微透镜应当可以观测到类似于地球大小的行星。

我们到现在还不知道对银河系中的暗物质而言，$MACHO_S$起着什么作用，假如是普通物质构成了$MACHO_S$，它们不足以解释已知存在于宇

宙中，甚至银河系中的暗物质主体。这样的状况令全世界许多实验室都在进行一系列的努力研究，尝试寻找能够将银河系束缚住的粒子暗物质。美国正在进行的两个重要项目，一是制冷暗物质搜寻者II，它的主要任务是搜寻具有原子质量且被称为中性伴随子的粒子；二是轴子实验，它的主要任务则是搜寻一种非常轻的被称为轴子的暗物质粒子。在超弦理论中有一个关于中性伴随子存在的预言，超弦理论是一个试图将引力与其他自然力联系在一起的大胆而有着很大希望的尝试。如果能发现中心伴随子或者轴子是将银河系束缚在一起的暗物质，那么不仅天体物理学中的暗物质问题能得到清楚的解释，也为研究自然界中的基本力和粒子的统一奠定了基础。

宇宙的结构

宇宙大爆炸瞬间微小的量子涨落星系尺度以下的宇宙结构埋下了种子，为了弄清楚这些“种子”是如何形成宇宙中的大尺度结构的，需要对现在星系的分布状况进行研究。十多年前进行的星系巡天的最大成果，就是发现有些巨大空洞仅包含少数星系，另一些尺度达到300亿光年的星系密度增高区域。星系巡天向我们揭示，这是宇宙中密度变化的极限，宇宙在更大尺度上看起来是十分平滑的。正在进行的巡天则将为我们展示更为精确的与宇宙相邻的星系分布图，特别是斯隆数字巡天（SDSS）。

宇宙中最古老的辐射——宇宙微波背景（CMB）是导致微小量子涨落的直接证据。宇宙大爆炸后仅数十万年就出现了这种辐射，当时这种辐射的温度低于太阳表面温度。由于宇宙膨胀的过程中引起的冷却，现在这种辐射的温度大约下降到原来的千分之一，也就是在零度以上约3℃。1989年，宇宙背景探测者卫星（COBE）成功发射,它仔细观测了这种辐射，并得出了非常精确的数据。这些数据表明，这种辐射具有黑体谱，与研究者的理论预言相符。同时，观测数据也显示了辐射强度中微小的空间起伏，这种起伏所指示的密度涨落能够形成宇宙中能观测到的大尺度结构。COBE的观测首次为我们进行宇宙学推测的基本模式提供了直接的经验证据，也为这个领域所有的后续工作建立了定量基础。

COBE卫星在设计时，其角分辨率非常低，因此只能观测到背景辐射中的最大尺度结构。背景辐射中较小尺度的特征则对宇宙中的物质和能量有着一定的依赖。借助于SDSS和超新星之类红移发生概率较低的研究得到的数据，我们能够确定宇宙的基本性质，包括宇宙的年龄，它所包含的物质、能量密度等。最新的观测显示，宇宙物质和能量的重密度几乎等于保证宇宙几何平坦需要的数值。美国国家航空航天局研制出来的MAP、欧洲航天局（ESA）的Plank巡天卫星、地面宇宙背景成像器以及未来的气球观测等，都将大大提高宇宙背景辐射研究的灵敏度。这些设备不仅可以达到更高的精度以测量宇宙学的基本参数，还可以严格检验许多流行的宇宙学理论。地面研究改变了测定出来的星系团内的热气体形成的背景辐射谱的形状，借助于Con–X观测到的这种热气体的性质，研究人员就能测量出星系团的距离，约束哈勃常数值（Hubble constant），进而测量宇宙中的大尺度几何。

这些设备刚开始研究的一个部分就是宇宙微波背景的偏振。宇宙大爆炸后最开始那一刻对引力波的影响促使背景辐射出现偏振。对于这种偏振的性质，下一代卫星CMB可以更加精确地进行测量，进一步对流行的暴胀宇宙学模型进行验证，并同时阐明地球加速器无法到达的宇宙中能量发生的物理变化。

宇宙的演化

正如我们在前面讲过的，大爆炸理论引领我们追溯宇宙的演化，直到探索到它起源于基本粒子混合的时刻，即最初的若干微秒。一些很有希望的观点认为，可以把对宇宙的追溯往前拉到粒子存在之前，那时量子涨落甚至是宇宙中最大的物质。那么大爆炸以来宇宙的膨胀是如何进行的呢？通过观测辐射的红移变化，我们能够对宇宙的膨胀进行测量。某个天体发光的红移越大，那么宇宙在这个辐射地方发出的膨胀就会越多。红移和时间的关系（宇宙钟的定标）对辐射是多久以前发射出来的起了决定作用。时间在光速作用下转化为距离，这一关系同样可以用来确定宇宙的几何状况，也就是空间是平直的还是弯曲的。哈勃参数（Hubble parameter）的常数决定了当前的膨胀时标（expansion time–

scale），膨胀时标又确定了红移和距离的关系。哈勃参数的常数值可以通过HST或者其他望远镜测量出，精确度大约为10%。

只有知道了宇宙膨胀如何随时间加速或者减速，才能从哈勃常数的测量值中推导出宇宙的年龄。宇宙中物质的总密度（普通物质和暗物质）和可能的非零“宇宙学常数”决定了宇宙的膨胀史。“宇宙学常数”或许表示着一种“暗能量”。这些参数决定了宇宙的几何性质以及未来发展趋势，那就是宇宙是会继续膨胀，还是会再次坍缩？

由于两组独立的观测，我们发现了暗物质。首先，有人找到了一种方法，通过Ia型超新星亮度下降的速度确定了它的光度。然后，通过光度测量或者计算它的亮度确定或计算出它的距离。得出的结果是，遥远的超新星亮度要比预料中的暗一些，这说明宇宙的膨胀速度在加快。再参考其他数据，对超新星的观测可以得出如下结论，暗能量在物质和能量的总密度中或许占据了70%的比例。其次，对宇宙微波背景涨落的观测强烈提示：宇宙确实是平直的，因此可以用它的临界值表示物质和能量的总密度。由于对星系团质量的估计，让我们知道宇宙中的物质密度大约是临界值的30%，故暗能量就一定占据了剩余的70%。借助于测量出来的哈勃常数值，以及物质和能量的估计值，我们推测出宇宙的年龄大约是140亿年。

对于这些观测数据，未来的观测者和理论家将努力理解并认真研究。证明暗能量的存在，并且具有与物质竞争的密度，将是一项重要且具有最基本意义的物理发现。宇宙微波背景观测将会得出更精确的包括普通物质密度在内的宇宙学参数值。通过LSST发现更多的超新星，然后用其他的地面仪器和空间望远镜进行更加精确和灵敏的测量，我们就可以以更高的精度标定宇宙时钟。那时候，我们将会知道，宇宙常数会像爱因斯坦假设的那样是恒定不变的，还是像其他流行理论学提出的那样随着时间演化。

第八章 探索地外生命

不明飞行物UFO

关于“不明飞行物”（unidentified flying object，缩写为UFO）的最早期的报道出现于19世纪70年代。1878年1月，美国德克萨斯州的农民马丁正在田里劳作，突然发现一个圆形物体在天空中飞行。UFO通常是指空中或者地面附近出现的能够发光的飞行物体。美国空军部的一份情报文献对UFO的定义，是指一种在性能、空气动力学特征和某些特殊细节上都与目前人们所知道的任何类型的飞机、导弹等物体不同，并且也不能被认为是常见的气球、天体、鸟群等物体的飞行器。

UFO的出现没有规律可循，而且转瞬即逝，加上存在太多不切实际的描述，因此就算是最出色的科学家也无法对UFO的所有报告资料进行清楚的解释。基于此，在1948到1969年的22年中，美国空军制订并执行了著名的“蓝皮书计划”（Project Blue Book）。这项计划资料丰富，包括12600份目击报告，其中有12000份报告中的UFO已被确定为已知物体，如飞机、气体、云彩、流星、鸟群、人造卫星以及光线反射等，但另外一些报告却完全无法用物理规律或者大气现象进行解释。

经过分析，UFO或许只是一种自然现象，又或许是一种幻觉。蓝皮书中记录了1948年发生的著名UFO事件：“1948年7月24日凌晨3点40分，两位驾驶着DC–3型飞机的驾驶员发现一个物体迎面从他们的右上方飞速掠过，上升至云中消失不见，整个过程大约持续了10秒钟。这个飞行物好像安装有类似火箭或喷气的动力装置，尾部可以发射出十几米长的火焰。这个物体没有翅膀，也没有显著的凸起物，但却有着两排发亮的窗户。”实际上，经过比对，那天夜里正好出现了流星雨，所以这个奇怪的物体被证实只是一颗远处划过的流星。

我们常说眼见为实，但事实上并不能太相信自己的眼睛。人眼有着非常大的生理局限性，常常会“欺骗”我们，例如有时会将一些小圆点看

成一条直线，有时将某些不规则形状的东西看成熟悉的物体，甚至因为受到观察角度或者天气条件的影响，视力非常好的人也会将一颗星星或者一架飞机看成是其他物体。我们来看一个很有代表性的例子：1955年3月3日夜间，天文学家门泽尔飞行在白令海峡附近的北极地带时，猛然发现一个闪烁着红绿两色光芒的明亮物体，从地平线的西南方向朝他的飞机射来，这一物体在离飞机大约100米的地方突然停了下来。这一飞行物的直径大约是满月直径的1/3，它一会儿消失在地平线上，一会儿又出现。门泽尔冷静下来才意识到，这应该是天狼星的模糊形象，它的时隐时现只是因为远处群山不时挡住了星光。

随着物理学家康顿主持的一项大型学术活动的调查，蓝皮书计划宣告结束。康顿的这项调查结果记录了1500多页，得出的结论是，没有确实的证据表明UFO是天外来客，因此，这样的调查可以停止了。

地球生命之源

生命来自于海洋的说法

通过恒星的演化过程，我们有理由认为，地球在诞生时周围就有一个原始大气层，大气层的主要成分是氢的化合物，包括水蒸气、氨、甲烷、硫化氢以及氰化氢等。或许还存在着一个由液态水构成的海洋，海水溶解了大气中的各种气体。生命要在一个这样的世界形成，简单分子就必须结合形成复杂分子。一般情况下，这个形成过程需要耗费能量，海洋被太阳光及其紫外辐射照耀，可以提供小分子结合成较大分子所必需的能量。

1952年，美国化学家米勒和尤里试图通过实验寻找一些较大的分子。他们制备出一些被认为可能存在于地球原始大气层中的物质的混合物，然后以放电作为能源，让这些混合物接受一段时间的照射。最后，他们发现这些混合物中含有一些原来没有的比较复杂的分子，而且还发现了其中所包含的氨基酸，这是用来制造重要化合物的原料。不过截至目前，即便凭借最丰富的想象力，仍然没有形成能够被称为生命的东

西。只是，我们现阶段仅仅使用少量液体进行研究，每个阶段也仅持续几个星期。对于原始地球来说，海洋中的海水受到阳光照射的时间长达十几亿年之久。真实情况可能是这样的：在阳光的照射下，海洋中的分子渐渐变得越来越复杂，到最后，在某些未知元素的影响下形成了某个分子，而这个分子能把较简单的分子组成与它自身相似的另一个复杂分子。于是，生命出现并开始延续，逐渐演变成了如今的形态。我们会发现，“生命”的原始形态比现在最简单的生命还要简单，但它们在当时已经是非常复杂的结构了。

与铁在潮湿的空气中一定会生锈一样，或许生命的出现并不是一种奇迹，而是各种分子沿着一条捷径彼此结合在一起的结果，这似乎是非常确定的事情。对于原始地球而言，生命的形成是一种必然现象。同样的道理 ，对于物理性质和化学性质与地球相似的所有其他行星来说，也一定会有生命形成，虽然那可能是不具有理性的生命。

生命来自于太空的说法

20世纪初期，瑞典著名的化学家阿列纽斯（Arrhenius）提出了电离理论学说，与此同时，他还提出了宇宙胚种论。他认为，地球生命是以原始生命孢子从宇宙空间来到地球上为发端的。生命孢子能够长时间忍受宇宙中的寒冷和无空气的环境。阿列纽斯确信，辐射压力是携带生命孢子从一个星球到达另一个星球的动力。因此他得出结论，宇宙中到处存在着生命的扩散。

不过，阿列纽斯理论存在着两个难以解释清楚的问题。第一，虽然孢子能够忍受寒冷和真空，但对于紫外线等其他能量辐射却无法承受，而宇宙空间中，至少在星球周围到处是这样的能量辐射，孢子是否能在这样的条件下生存要打一个大问号。第二，孢子理论没有对生命的起源进行清楚的解释，并且回避了有生命的孢子形态是否存在这个问题。如果生命来源于另一个世界而不是地球，当它到达地球之后是以有生命的孢子形式存在，那么另一个世界的生命是如何来的呢？

虽然地球生命来源于天外的提法受到类似上述的质疑，但仍然有许多学者发表了各种假说。20世纪70年代末期，英国天文学家霍伊尔

（Hoyle）认为，生命来源于遥远的外太空，而非地球。还有一些人认为，是彗星或其他地外天体靠近地球时，将早期生命的种子带到了地球上。

在地球尚未形成、整个太阳系都被分子云所包裹着时，生命就已经形成了。不过，当太阳要从分子中“脱胎”而出时，它所吹出的强劲恒星风将包围它的原始物质吹散了。太阳周围再也没有这样的物质了。但幸运的是，宇宙空间中还存有一些分子云，在我们研究生命形成的过程中，它们有着如同“化石”般重要的作用。通过大型射电望远镜能够观察到来自这些分子云的辐射，从而可以对分子云在不同演化阶段的物理特征和化学组成进行研究，确定其形成过程，在分子云中建立分子演化链。天文学家目前已经观测到了90多种分子，其中大部分属于有机分子。对于银河系来说，猎户座大星云是人们研究得最仔细、最透彻的天体，人们在这个星云中已搜寻到60多种星际分子。因此，猎户座大星云也成为现在许多科幻片的创作背景。

探索太阳系

人类从来没有停止过对外星生命的探索。最初的探索对象是月球，有人大胆设想月球上存在着智能生物，并且由此想象出了许多故事；更有人提出月球是外星人建造出来的空心球体，这里面存在着许多以人类现有技术无法探知的秘密，类似月球内部可能是一个神奇的生态系统，有着非常先进的文明，这里或许是外星人研究地球的驿站等，好在这种毫无根据的想象很快被理性的人们抛诸脑后。

其实，只有满足一系列生物生存的必要条件，生命才能在行星上形成并逐渐发展。例如，行星上的生命诞生、存在和发展都与自身能发光发热的恒星密切相关。根据恒星演化理论，气体尘埃云的收缩形成了恒星。一般情况下，密度很低的原始星云会在自身引力作用下慢慢收缩，逐渐变成一个自转的扁平圆盘，中央部分则因密度比较大、温度比较高，于是在热核反应过程中形成了恒星，而其周围的物质盘就逐渐形成了如太阳系这样的行星系统。

地球上有着充足的水和含氧丰富的空气，又有适宜的温度，这与地球和太阳之间的距离等条件有着密切关系。水星的昼夜温差极大；金星大气中的主要成分是二氧化碳，存在着严重的温室效应，生物根本无法生存；火星上的条件尽管与地球相似，但似乎并没有发现存在生命，而且还不知道火星上面是否有水资源。十几年前，宇宙飞船进行空间探测时，发现木星和土星上也都没有生命存在的迹象。太阳系中的天王星、海王星以及冥王星因处于偏远位置，它们的环境也不适宜生命存在。截至目前，所有对太阳系进行的观测结果都表明，除了地球之外，始终没能发现和证实还有哪个星球适于生命存在。

探索银河系

银河系是一个直径约为10万光年的盘状星系，主要由恒星、气体和尘埃组成，年龄在100亿到150亿年之间，包含的恒星数目大约是一两千亿颗，其中至少有数十亿颗恒星与太阳极为相似。天文学家推测，在所有恒星中，至少应该有数千万颗恒星周围是有行星围绕运行的，而这些行星中又至少有数百万颗具有适宜生命存在的环境条件。如果生命不是上帝创造而是在自然条件中形成的，那么银河系中至少应该有上万个行星上有生命存在。或者保守一点讲，银河系中至少存在几百个生存着智慧生命的高级星球。

一些人认为，在漫长的150多亿年中，如果一个存在智慧生命的星球拥有高度的文明（掌握了通信技术和星际航行的能力），那么在5000万到1亿年的时间内，无论是智慧生命还是文明，都应该扩张到整个银河系——从一颗恒星传递到另一颗恒星上。不过，当我们观测周围的宇宙空间时，从来没有发现哪个天体存在大量智慧生物，而且也没有充分的证据显示外星人曾经拜访过地球。

对于探索太阳系之外围绕着恒星运行的行星，到现在依然是一件艰难的事情。虽然天文学家早已意识到，长期且精确地观测某个恒星的运行情况，研究它是否会出现摆动现象，就有可能发现围绕在它周围的暗弱伴星。不过，现在探测地外行星系统的技术还不够灵敏和完善，而且

观测到一颗恒星的摆动，还只是寻找行星存在的一种间接方法。直接的检测意味着必须得到一颗行星的图像及其可以测定的准确位置。1983年，第一颗红外天文卫星IRAS发射成功，它传递回地球一条振奋人心的宇宙信息：明亮的织女星周围存在着一些固体团状物质，只不过这些物质的温度非常低。于是，人们推测，那里可能有一个“太阳系”正在缓慢形成，那些团状物质应该属于正处在凝聚过程中的年轻行星。如果那里的自然环境适宜生命繁衍，那么在未来，这些行星上也可能会出现外星人。

绿岸公式

1991年11月，一场学术研讨会在美国西弗吉尼亚州绿岸镇附近的国立射电天文台举行，天体物理学家德雷克（Drake）在会上提出了一个著名的方程，后来被人们称为“绿岸公式”，这是天文学术界对地外智慧生命进行定量分析的第一次尝试。

德雷克的“绿岸公式”是：$N=R\times n_e\times f_p\times f_1\times f_i\times f_e\times L$。在这个公式中，$N$表示银河系中能够观测到的技术文明星球的数量，它是由等式右边7个数字的乘积决定的。R表示银河系中与太阳相似的恒星的形成率，也就是每年平均可以形成的类似太阳的恒星颗数，因为通常情况下只有像太阳这样的恒星才能孕育出智慧生命。n_e表示在可能拥有自己行星的恒星中，其生态环境适合生命存在的恒星的平均颗数。f_p指的是光度恒稳，能长时间照耀并能满足形成智慧生命演化所需条件的恒星，即所谓的“好太阳”的颗数。f_1代表的则是已经出现生命的行星在可能存在生命的行星中所占的比例。f_i表示已经拥有智慧生命的行星数目，因为低等生物演化到智慧生命的概率毕竟很小。f_e表示的是在这些已经有智慧生命的行星中，已经达到先进文明的高级智慧生命的行星（能传递星际电磁波联络）的比例。L表示拥有先进文明世界的平均寿命，因为只有长时间持续发展的文明星球才有可能进行星际互动。

“绿岸公式”以等号右边7个数的乘积形式表示，但现在还不知道这些因子的具体数字。在公式中，有些因子能够用近似值表示（如R），有些因子是完全主观的（如L）。有些学者提出，除了L外，其余因子的乘积表示的是银河系中能够检测到的文明星球的产率，从而得出结论，

银河系中高级文明星球的数目在40万至5000万之间。美国著名科普作家阿西莫夫（Asimov）也曾提出过一个公式，这个公式与“绿岸公式”非常相似，他以这个公式推测银河系中存在的文明星球大约有53万颗。

“奥兹玛”计划

20世纪60年代，美国西弗吉尼亚州西部绿岸镇附近的国家射电天文台开始试图接收地外文明星球传递的无线电信号。这项工作于1960年4月11日正式启动，被命名为“奥兹玛计划”（Ozma　project），其组织者正是美国射电天文学家德雷克。在神话传说中，“奥兹”是一个遥远且难以抵达的地方，一位名叫“奥兹玛”的公主就居住在那里。于是，“奥兹玛”这个名字就寓意“搜寻遥远的地外文明”，搜索“外星人”的信息。

德雷克和他的工作伙伴通过一架口径26米的射电望远镜，利用21厘米的波长来接收信号。选择这个波长是有一定条件的。不过，我们如何推测外星人会使用什么样的波长呢？物理学家认为，宇宙中含量最多的元素是氢，因此根据常理推测，智慧生物对氢元素都非常熟悉。而21厘米的波长恰好是氢原子发出的微波的波长，它可能是被宇宙间所有智慧生物研究得最透彻，也是被运用得最熟练的。

德雷克研究团队首先通过射电天线对恒星鲸鱼座中的τ星进行研究，这是一颗类似于太阳的恒星，它与地球之间的距离大约是11.9光年，但结果让人沮丧——研究团队毫无收获。后来，他们又开始研究波江座中的ε星，开始时接收到了一个无线电信号，这个信号的强度是每秒8个脉冲；10天后，他们再次接收到了这个信号，不过，这并不是期待中的“外星人”传递过来的信号。“奥兹玛计划”进行了三个月，最终没有收获任何成功的结果。虽然如此，它作为人类寻找地外智慧生命的起点，功不可没。

关于接收外星人信号的各种困难，德雷克教授指出：“我们对整个天空的研究好比大海捞针，即使有阿雷西博那样强大的望远镜助力，依然需要向2000多万个方向进行探测。”不过直到现在，我们也只是监测到地球附近的几千个星球而已，而且频率范围也非常有限。

美国哈佛大学天体物理学家保罗·霍罗威茨（Paul　Horowitz）等人

于1985年开始进行一项寻找外星人的新计划，这项计划被命名为“太空多通道分析”计划（META）。他们用800多万个不同频率，进行高度自动化探测。但令人心酸的是，随着波段上万倍的大量增加，工作量猛然增多，覆盖整个天空一次就需要长达200到400天的时间，美国、苏联、澳大利亚、加拿大、德国、法国、荷兰等国家先后加入了这一探索计划。

在“奥兹玛计划”之后，国际上已经出现了包括“太空多通道分析”计划在内的多种探测地外智慧生命的计划。人们达成了一个共识：如同地球上人类的情况一样，地外“太阳系”中很可能会形成生命，因此探测目标应该集中在类似于太阳的星球上；射电望远镜能够“听到”的最佳频率范围是1000到10000兆赫，此时的本底噪音最小，所以“外星人”可能会利用这个波段作为“微波窗口”与我们进行星际互动。如果想要探索其他星球的信息，应该选择以光速进行传播的电磁波。令人遗憾的是，所有这些努力似乎都徒劳无功，我们并没有接收到任何可以确认为地外星球传递出的与生命相关的消息。

版权信息

书名：通俗天文学

作者：(美) 西蒙·纽康著

出版社：天津科学技术出版社

出版时间：2020年6月

ISBN：978-7-5576-7566-0

版权所有·侵权必究

紫图书库 大师经典 8024 025

一部把天文学讲活了的顶级科普读物，令你读读读读读不停！

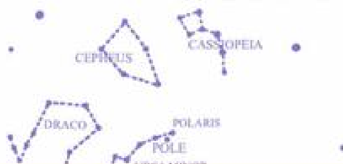
全新修订，最新进展！时间见证人类探索宇宙的脚步，本书添加了部分理论的最新研究成果，在确保译文准确性的同时，让读者尽情感受天文学的魅力。

经典永传，畅销百年！《通俗天文学》最早出版于1902年，吸引全球亿万读者，被列为天文学必读书目，即使是天文学爱好者也能看得懂，堪称当今世界最具影响力的科普经典之一。

深入浅出，通俗易懂！作者西蒙·纽康避开生涩枯燥的描述方式，用生动有趣的文笔，将天文知识化繁为简；27幅简约插图，用线条勾勒天际，让您对天文学产生浓厚的兴趣。

纽康教授所获得的一系列荣誉，体现了他在天文学上的崇高地位。在半个多世纪的时间里，他不知疲倦地投入研究，以哲学的睿智为指导，成为美国同行中的翘楚，跻身于世界古今成就最高的天文学家行列。

——*美国国家科学院院长 美国天文学会会长* 威廉·坎贝尔



对于人类来说，宇宙是个大谜题，这本书给了你猜谜的兴趣和解谜的信心。

考虑到他的工作范围之广泛研究性质之重要，论及问题之丰富，以及他对目标秉持到底、始终不懈的追求，纽康肯定是那个时代最显赫的天文学家之一。

——《大英百科全书》



上架建议：畅销·科普



定价：49.90 元

Charles Darwin



The Origin of Species







跨越
三个世纪的
传世经典

The Origin of Species

物种起源

改变人类历史进程的
生物进化巨著

[英] 查尔斯·达尔文 / 著
朱登 / 译





读《物种起源》是一生必做的100件事之一。——英国《新科学家》(*New Scientist*)

你真的了解"物竞天择"吗？
谁才是不被淘汰的"适者"？

在人们普遍相信地球只有6000岁
万物由造物主创造的时代
看达尔文如何找到物种的起源
得出改变全人类的进化论

目录

第一章：家养状态下的变异
第二章：自然状态下的变异
第三章：生存斗争
第四章：自然选择即适者生存
第五章：变异的法则
第六章：学说的难点
第七章：对自然选择学说的各种异议
第八章：本能
第九章：杂种性质
第十章：地质记录的不完整
第十一章：古生物的演替
第十二章：生物的地理分布
第十三章：生物的地理分布（续）
第十四章：生物间的亲缘关系：形态学、胚胎学和退化器官的证据
第十五章：综述和结论

第一章：家养状态下的变异

变异的原因

如果将有着悠久历史的栽培植物和家养动物的同一变种或亚变种的个体进行比较，最能引起我们注意的一点就是：栽培植物和家养动物间的个体差异，要远远大于自然状态下的任何物种或者变种间的个体差异。经过人类在极不相同的气候等条件下的培育，形形色色的栽培植物和家养动物都发生了变异。对此加以思索后，我们必然会得出结论：家养生物的生存条件与亲种在自然状态下的生存条件十分不同，由此才产生了巨大的变异。奈特曾经提出这样的观点：过多的养料和食物造成了家养生物的变异，这样的说法也不无道理。有一点很明显，只有在新的生存条件下，并且生长了数个世代，生物才能发生巨大的变异；而且一旦生物体制开始变异，一般就能够在往后的若干世代继续变异下去。一种可以变异的生物，在经过培育产生变异后又停止变异的例子，目前尚无文献记载。最古老的栽培植物至今还在持续不断地产生新的变种，例如小麦；最古老的家养动物，至今仍能迅速地改进或者发生变异。

在长期研究这个问题之后，我认为生存条件会起作用，主要是通过以下两种方式：一种是直接作用于整体生物机制或者某些部分；另一种是间接作用于生物的生殖系统。对于直接作用，如魏斯曼教授近来提出的，以及我以前在《家养状态下的变异》一书里提到的，它有两个方面的因素：生物本身的性质和外部条件的性质。而内部因素比外部因素更重要，因为在不一样的外部条件下，有时能发生相似的变异；在相同的外部条件下，有时却会产生不一样的变异。对于产生变异的后代来说，这些外部条件的变异效果或是一定的，或是不定的。如果是数代生长在某个相同的外部条件下，一切后代或者几乎一切后代都以相同的方式发生变异，那么就是一定变异。然而，对于一定变异的变化范围，我们很难定论，有些细微变异却是毋庸置疑的：例如食物充足与否引起的生物体大小的变异；食物性质导致的生物体肤色的变异；气候变化引起的生

物体皮毛厚薄程度的变异等。我们在家禽的羽毛中看到无数变异，每一个变异都是受到某种特别因素的影响而形成的。如果这一特定因素经过数个世代，同样作用于许多的不同生物体，那么这些生物体都可能产生相同的变异。如果将能够制造树瘤的昆虫的微量毒汁注射到植物体内，必然会产生复杂多变的树瘤。这证明了，如果植物体液发生了化学变化，植物便会发生奇特的变形。

和一定变异不同的是，不定变异更多是由于环境发生了改变，而且在家养物种的形成中，不定变异起着更重要的作用。不定变异从无数的微小特征中可以体现出来，正是这些微小特征让我们可以分辨出同一物种中的不同个体。这些不定变异不能认为是从亲代或者更远的祖先那里遗传下来的，因为即使是同一胎的幼体或者同一蒴果萌发出的幼苗，彼此之间也可能产生极其明显的差异。在同样的地区，用差不多相同的饲料进行喂养，经过很长一段时间之后产生的几百万个个体中，偶尔在构造上也会出现明显的变异，这种变异甚至可以用畸形来形容；但是畸形和轻微变异之间，并不存在明显的分界线。在一起生活的众多个体中，这种结构上的变化无论是轻微还是显著，都可以认为是环境条件对不同个体引发的不定效果。这就好像不同的人对严寒天气的反应不同一样，有人会咳嗽，有人会感冒，有人会得风湿病，还有人会引发器官上的炎症。

至于生存条件对生物体所起的间接作用，也就是对生殖系统所起的作用，我们可以推导出，这个作用之所以会引起变异，主要有以下两方面的原因：第一，生殖系统对任何外部条件的变化都非常敏感；第二，正如凯洛依德所说，动植物在新的环境下被培育产生的变异，有时候和不同的物种之间杂交引起的变异非常相似。许多事实表明，生殖系统对周围环境条件的轻微变化都极为敏感。驯养动物是很容易的事情，但是圈养条件的动物，想让它们自由繁育并不容易，即使只是交配，也是很难完成的事情。许多动物即使是在原产地这种近乎它们自然生长的环境条件下，也无法生育。如果仅仅是简单地将原因归结为动物的生殖本能受到了损害，显然是不科学的。许多栽培植物看起来长势良好，但是却很少结籽或者根本不结籽。有时候，在某些特殊阶段的一些微小的条件变化，比如水分多一点或者少一点，都会影响植物的结籽情况。对于这

个奇妙的问题，我在其他地方解释过，在此不再赘述。我想说明的是，圈养动物的生殖法则十分奇妙。例如很多从非洲引进到英国的肉食兽类被圈养，大部分都能正常地繁育，除了熊科动物以外。而鸟类正好相反，对于肉食鸟类来说，只有很少一部分能产下受精卵进行繁殖。许多外来植物就好像那些不能繁育的杂交物种一样，它们的花粉毫无用处。一方面，我们可以看到被驯化的物种，在家养状态下，柔弱多病却可以自由繁育；另一方面，一些幼年期从自然界迁移并进行人工养育的物种，虽然可以茁壮成长而且寿命很长（我可以就此举出无数的实例），但是它们的生殖系统却受到了不明因素的影响而无法再繁育。当圈养物种生殖系统发生变异，繁育出了与双亲不太相似的后代时，我们也就不会觉得奇怪了。还有一点需要补充一下：一些动物在极不自然的生活环境中（例如雪貂和兔子被饲养在箱笼中）也可以自由繁育，这说明它们的生殖系统并没有受到整个封闭环境的影响。所以，有些动植物可以经受住家养或者栽培，并且很少发生变异，甚至比在自然环境下产生变异的概率更小。

一些博物学家认为，所有变异都和有性生殖的作用有关，这显然是不对的。在以前的一部作品中，我曾将园艺家称为“芽变”的植物列出了一个长表。芽变植物会突然萌生出一个新芽，这个新芽具有与其他芽明显不同的性状。这是一种变异的芽，它可以通过嫁接、扦插甚至是播种的方式来进行繁育。在自然环境下，这种芽变很难产生，但是在人工栽培中却经常出现。生长环境相同的同一棵树上，每年会长出成百上千个芽，其中会突然出现一个具有新性状的芽；而在不同环境中不同的树上，有时候会出现同样性状变异的新芽。例如从普通桃树的芽上生出油桃，或者从普通蔷薇的芽上生出苔蔷薇。因此，我们可以很清楚地看到，在决定生物体每一变异的特殊类型上，生物体本身的内在因素比外部环境因素重要得多。

习性和器官的使用与不使用的效果；相关变异；遗传

习性的改变能产生遗传效应，例如植物从一个地区迁移到不同气候的另一个地区，它们的花期会发生改变。就动物而言，身体的各个部分是否常用，产生的影响则更为明显。比如家鸭和野鸭，相比较而言，家

鸭的翅骨占整体骨骼的比重比野鸭要小，而腿骨占整体骨骼的比重却比野鸭要大。很显然，造成这种变化的原因是家鸭相较于野鸭来说飞行少而走动多。同样，对于母牛和母山羊的乳房来说，惯于挤奶的部位比不常挤奶的部位发育得更好。在有些地区，家养动物的耳朵总是下垂的，有人认为家养环境下的动物受到的惊吓比在野外要少，从而耳肌的使用机会相应减少，因此耳朵才会下垂，这样的说法也是不无道理的。

支配变异的法则非常多，然而我们只能模糊发现其中为数不多的几条。对此以后我会约略介绍，但在这里只是想谈论相关变异。如果在胚胎和幼体期发生了巨大的变异，这很可能会造成成体期的变异。在畸形生物身上，各种不同构造之间的相关作用是非常神奇的，对于这一点，小圣提雷尔作品中的许多实例都与此有关。饲养者们都认为，四肢长的动物，通常头也长。还有一些相关变异的例子，都非常奇怪。例如，全身白毛蓝眼睛的猫，一般都耳聋，但是泰特先生说，只有雄猫会出现这种状况。色彩和体质特征的关联，在很多动植物中都会出现。根据赫辛格的观察发现，某些植物如果被白色的猪和绵羊食用后，会对猪和绵羊产生伤害，却不会对深色的猪和绵羊造成影响。怀曼教授最近来信提到：他曾经问弗吉尼亚的农民，为什么他们养的猪都是黑色的。农民们回答说，猪吃了赤根，骨头就会变成淡红色，而且只有黑猪的蹄子没有脱落。该地区另一个农民又说：“我们通常会在一窝猪崽里挑选黑色的来饲养，因为只有黑猪才有更大的生存机会。”除此之外，无毛的狗牙不全；毛长且粗的动物，其角也长且多；脚上长毛的鸽子，外趾中间有皮膜；短喙的鸽子脚小，长喙的鸽子脚大。所以，人如果根据某一性状进行选择，这一性状就会加强，同时因为奇特的相关变异法则，还会无意中改变其他部分的构造。

各种未知的或者仅能模糊理解的变异法则，会产生形形色色无限复杂的效应。仔细研究一下风信子、马铃薯甚至大丽花等历史久远的栽培植物，相关论文是非常值得阅读的。各个变种和亚变种之间在构造和体质上都会有无穷无尽的细微差异，这让我们感到特别惊讶。这些生物体的整体构造变得可塑了，并且正在以轻微的差异慢慢远离亲代的体制。

对于我们而言，不遗传的变异无关紧要。但是可遗传的构造上变异，无论是微小的，还是具有重要生理作用的，其数量与多样性都是难

以计数的。关于这一点，卢卡斯的两部巨著做出了最详细、最充分的解释。没有一个饲养者会怀疑遗传的强大作用，他们都相信物生其类。只有那些空谈理论的著作家们，才会怀疑这个原理。构造上的偏差常常同时出现在父代和子代身上，我们无法确定这样的偏差是否由同一原因造成。但是，在处于相同条件下的数百万个个体中，由于某些特殊情况的结合，某些罕见的变异偶然出现在亲代又重现于子代，单纯的机会主义几乎迫使我们将其重现归因于遗传。大家一定听说过，白化病、刺皮、多毛症等出现在同一个家庭的不同成员身上。如果奇异和罕见的结构偏差是真正的遗传，那么普通和常见的偏差自然也可以被视为遗传。也许研究这个问题的正确方法是：把各种性状的遗传看作规律，把不遗传看作异常。

支配遗传的法则，很多都还是未知的。没有人能解释：为什么相同物种的不同个体或者不同物种的相同特性，有的会遗传有的却不会；为什么子代常常会出现其祖父母或者更远祖先身上的某种特性；为什么某一特性常常会从一个性别遗传给雌雄两性后代，或者只遗传给单一性别，当然通常情况下是遗传给同性，但是也并非绝对。有一个非常重要的事实是，雄性家养动物身上的特性通常只会遗传或者很大程度上遗传给雄性。还有一个更重要并可信的规律是：不管在其一生的哪个时期出现的某种特性，其后代往往在相同时期也会出现相同的特性（虽然有时候会提前一些）。在很多情况下，这一规律都得到了证实：牛角的遗传特性只有在后代几乎成熟时才会出现；家蚕的特性，相对应的也只会在幼虫期或者蚕蛹期出现。但是遗传性疾病和其他一些事实让我相信，这种规律的适用范围应该更广泛。虽然没有明确的理由可以证明某种特性应该在一定的时期出现，但可以肯定的是，这种特性在后代出现的时间与父代出现的时间基本一致。我认为该规律对于解释胚胎学定律至关重要。上述意见仅针对特性的初次出现，并非针对作用于胚珠或者雄性生殖质的最初原因。短角的母牛和长角的公牛交配，产生的后代牛角变长了，虽然这一特性出现在生命的较晚时期，但显然是雄性生殖质起的作用。

提到返祖问题，在这里我想谈论一下博物学家们经常提起的一个观点，那就是如果把我们家养的物种放归野外自然的生存环境之后，它们

会逐渐重现原始祖先的特性。因此，有人认为，不能通过对家养物种的研究来推断自然条件下物种的演变。我也曾尝试去寻找如此频繁而大胆的论述的依据，然而并未找到。要证明这个观点的真实性是非常困难的，而且我可以很肯定的是，大多数性状突出的家养动物不可能在野外生存下去。在很多情况下，我们并不知道家养动物的变种是什么，所以也很难确定它们是否会完全重现原始祖先的特性。为了防止杂交的影响，我们必须将新的单一变种放在一个新的地方。但是有时候我们的家养变种确实会出现某些其原始祖先的特性，所以下列情况是有可能发生的：如果我们将一些不同品种的甘蓝成功地种植在贫瘠的土壤中（在这种情况下，贫瘠的土壤也会起到一定的作用），经过数代之后，它们将很大程度上或者完全重现原始祖先的特性。实验成功与否对我们的论点并不重要，因为实验本身已经改变了生存条件。如果有人可以证明，将大量家养变种放在同样的条件下，让它们自由杂交，通过相互混合来防止任何结构上的微小偏差，它们还能显示出强大的返祖倾向——即失去它们已经获得的性状，那么我就承认我们不能通过家养生物的变异来推导自然界的物种演变。但是并没有任何、哪怕一丁点的证据来支持这种观点：断言我们不能将拉车马和赛马、长角牛和短角牛、各种家禽以及各种蔬菜，无数代地一直繁殖下去，这种观点是违背了一切经验和事实的。

家养变种的性状；变种和物种的区别；起源于一个或多个物种的家养变种

当我们观察家养动植物的遗传变种或者品种，并把它们和亲缘关系比较密切的物种进行比较时，就会发现如前所述，每个家养变种的性状都不如原种一致。家养变种常常会出现一些畸形的性状；也就是说，它们彼此之间以及同属其他物种之间，虽然在某些方面差异很细微，但是却常常在另外一些部分有着极端的差异，尤其是与最接近自然条件下生长的物种比较时，差异更为明显。除了畸形性状之外（还有变种杂交的完全可育性，后面会讲到这一点），同一物种在家养状态下不同变种之间的差异，与它们在自然环境下生长的同属近缘物种之间的差异类似，只是前者的差异通常更小一些。我们必须承认这一点。许多动植物的家

养品种，某些有能力的鉴定家认为它们是不同物种的后代，而同时，另外一些有能力的鉴定家则认为它们仅仅是同一物种的不同变种。如果家养的品种和物种之间存在着巨大差异，那么这种争论就不会长久存在。人们常常说，家养变种之间的差异一定不会达到属级的程度。依我看来，这种说法并不正确。博物学家们对于如何界定生物性状上的差异是否达到了属的程度各有看法，他们通常是根据个人经验来制定鉴定的标准。当弄清楚了自然环境中属的起源之后，我们就会知道，无法经常在家养的品种中找到性状差异足以达到属的程度的变异。

当我们试图估计近缘家养物种之间的结构差异数量时，由于不知道它们是来自同一亲种还是多个亲种，我们很快会陷入疑惑。如果可以解决这个疑问，那应该是非常有趣的。众所周知，灵缇犬、寻血猎犬、□犬、西班牙猎犬和斗牛犬都能以纯种繁殖，如果能证明它们起源于同一物种，那么将使我们对自然界中许多近缘物种（例如世界各地的狐狸）是不变的说法产生极大的怀疑。我不相信所有的狗的差异都是在家养状态下产生的，这一点后面将会讨论。但是，有一些特征显著的家养物种，有推论甚至是强有力的证据证明它们源自同一个野生原种。

人们通常认为，人类会选择变异性大且能够适应各种气候环境的动植物来进行驯养和培育。我不否认这些能力在很大程度上增加了大多数家养物种的价值。然而那些未开化的蛮人在第一次驯化动物时，怎么知道它们的后代是否会产生变异，是否能适应不同的气候环境呢？驴和鹅的变异性很小，驯鹿耐热能力差，普通骆驼耐寒能力差，难道这些特点会阻止它们被家养吗？我相信，如果现在从自然环境中取来一些动植物，在数量、产地以及分类纲目上类似于现在的家养动植物，并且在同样的家养状态下繁殖了同样多的世代，那么，一般而言，它们的变异量会与我们现有的家养动植物原种发生的变异量一样多。

就大多数从远古时期就开始被家养的动植物而言，它们到底是同一个物种还是从多个物种繁衍而来，我们尚未得出定论。相信我们的家畜是来自多个物种繁衍的人，他们的主要依据是，上古时期，在古埃及石碑和瑞士湖上先民的住所里，发现的家畜物种是多种多样的，并且某些古代物种与至今仍存在的物种相似甚至完全相同。但是这些仅仅只能证明，人类的历史文化久远，以及人类对物种的驯养比我们想象的要更早

一些而已。瑞士湖上的居民曾经栽种过若干种大麦、小麦、豌豆、制油用的罂粟和亚麻，也驯养过好几种家畜。同时，他们还与其他民族通商。正如霍纳先生评论说，这一切都表明，在很早时期，瑞士湖上的居民就已经拥有了很高的文明；同时也表明，在这一时期之前，还有过很长久的较低文明时期，在那段时期，不同地区人们驯养的动物已经开始慢慢发生变异并逐渐形成不同的品种了。自从在世界各地发现燧石器之后，所有地质学家们都相信，在非常久远的时代，原始人就已经存在了。我们也知道，现在没有哪一个民族未开化到连狗都不会饲养。

也许，对于很多家养动物的起源，我们永远也无法弄清楚。但是我想说明的是，我曾仔细研究过世界上的各种家养犬种，并且搜集了所有已知事实，得出这样的结论：犬科中有几个野生物种曾经被驯养过，在某种情形下，它们的血液曾经混合在一起，并在现在家犬的血管中流淌着。至于绵羊和山羊，我暂时还没有定论。根据布莱斯先生告诉我的事实来看，印度产的瘤牛，其习性、声音、体质和构造等方面与欧洲牛不同，据此我们可以判断，印度瘤牛和欧洲牛源自不同的祖先。某些有能力的鉴定家认为欧洲牛有两到三个野生祖先（但是不知道它们是否可以称为物种）。其实，卢特梅耶教授所做的伟大研究已经证明了这一结论，包括印度瘤牛和普通牛的种级区别。对于马，我和几位作者持不同意见，我认为，所有的家养马都源自同一个野生原种，我无法在此给出理由。我很重视学识极为丰富的布莱斯先生的一个观点，即所有英国家养鸡的品种都源于印度野生鸡。我饲养过几乎所有品种的英国鸡，让它们交配和繁殖，并且对它们的骨骼进行了研究，由此得出了和布莱斯先生一样的结论。至于鸭子和兔子，尽管品种之间的结构差异很大，但是我相信它们全部源自普通的野鸭和野兔。

一些作者把某些家养物种起源于不同原始物种的学说推向了荒谬的极端。他们相信，那些可以独立繁殖的家养品种，即使其性状上的差异极其细微，也是源自不同的野生物种。按照这种观点，在欧洲，至少存在20种野牛和野绵羊以及数种野山羊，甚至在英国也有若干个物种存在。其中一位作者认为，在英国曾经有11个野生绵羊种。我们必须牢记，英国现在几乎没有特有的哺乳动物，法国只有极少数哺乳动物和德国不同，匈牙利、西班牙等国家也是如此，但是这些国家都有几种特有

的牛、羊品种。我们必须承认，许多家养品种都源于欧洲，否则它们何时从何地而来呢？印度同样如此。我承认，全世界的家犬源于几个不同的野生犬种，但是这些家犬中，也必然存在着大量的遗传变异。意大利灵缇犬、寻血猎犬、斗牛犬、布莱尼姆长耳猎狗等犬种与所有野生犬种差异巨大，谁能相信与它们类似的动物曾经在自然环境下生存过呢？人们常常随意地说，现有的狗的品种都是由过去几种原始犬种杂交而来的。但是通过杂交，我们只能获得介于双亲之间的类型。如果要用杂交来解释现有犬种的来源，那么我们必须承认，像意大利灵缇犬、寻血猎犬、斗牛犬等极端型的狗曾经在自然环境下生存过。况且，通过杂交来获得不同品种的可能性已经被极度夸大了。毫无疑问，偶尔通过精心挑选某些带有我们需要的性状的个体进行杂交时，会发生品种的变异；但是我很难相信，一个新的品种会从两个截然不同的品种之间杂交获得。西布赖特爵士曾经对此做过实验，但是失败了。两个纯种之间第一次杂交后第一次产生的后代（如我在鸽子中发现的一样），性状相当一致，一切似乎都很简单。但是如果我们让这些后代继续杂交几代之后，几乎没有两个个体是相似的，显然，接下来的事情将会变得非常困难，甚至可以说是毫无希望的。

家鸽的差异和起源

我认为用特殊的种类来做研究是最好的方法，经过深思熟虑，我选择了家鸽作为研究对象。我设法保留了所有能够买到或者求得的品种，还从世界各地得到了他人热心惠赠的各种鸽皮，特别是埃利奥特从印度寄来的标本和默里从波斯寄来的标本。各种不同语言的有关鸽子的论文都曾大量被发表过，其中一些因为年代久远而极其重要。我曾经和几位杰出的鸽友联系过，同时还加入了伦敦的两个养鸽俱乐部。鸽子品种的多样性实在是令人感到惊讶。比较一下英国信鸽和短面翻飞鸽，就会发现它们的喙和头骨有着奇妙的差异。英国信鸽，尤其是雄性，头皮上有明显的肉突，眼睑很长，鼻孔很大，而且喙也很宽大。短面翻飞鸽的喙和雀科类似，普通的翻飞鸽有着独特的遗传习惯，它们经常在高空聚集翻筋斗。鸾鸽体形硕大，喙长而粗大，脚也很大。其中有些亚种，脖子很长，有些翅膀和尾巴很长，而另外一些则尾巴很短。勾喙帕布鸽与信鸽相似，但是它们的喙短而宽，不像信鸽那样长。球胸鸽有着细长的身

体、翅膀和腿，它们的嗉囊异常发达，感到得意时嗉囊会膨胀，这一点可能让人感觉很惊讶甚至是可笑。浮羽鸽喙短且呈圆锥形，胸部下方有一排倒生的羽毛，它具有能使食管上部不断微微膨大起来的习性。毛领鸽颈背的羽毛，向前倒竖，呈凤冠状，按其身体比例来说，翅羽和尾羽都很长。喇叭鸽和笑鸽，顾名思义，它们的鸣叫声与其他品种截然不同。孔雀鸽一般有30～40根尾羽，而其余鸽类正常的尾羽数是12或14根。一些品种优良的孔雀鸽展开竖立尾羽时，甚至可以头尾相接。此外，孔雀鸽的脂腺已经严重退化了。我们还可以列举出一些有较小差异的品种。

对于骨骼来说，这些品种的面部骨骼在长度、宽度和曲度上差异很大；下颌支骨的性状、长度和宽度的变异显著；尾椎与荐椎在数量上存在差异；肋骨的数目、相对宽度以及是否突起等也有一些差异；胸骨上孔的大小和形态有很大的变异；两叉骨的角度和相对宽度也是如此。以下这些部位很容易发生变异：口裂的相对宽度，鼻孔、眼睑和舌（并不是总与喙的长度严格有关）的相对长度，嗉囊和上部食管的大小，脂腺的发育程度，主要的翅羽和尾羽的数目，翅和尾的相对长度，翅和身体的相对长度，腿和脚的相对长度，脚趾上鳞片的数目和脚趾间皮膜的发育程度等。羽毛完全长出来的时间各不相同，初生雏鸟的绒毛状态也是如此。卵的性状和大小也各有不同。飞行的方式、鸣叫声和性格也明显不同。最后，在某些品种中，雌鸟和雄鸟之间也有细微的差别。

如果我们从以上家鸽中选出20个品种请鸟类专家进行鉴定，并且告诉他这些都是野鸟，那么他必然会将这些家鸽列为不同的物种。而且，我不相信有任何鸟类专家会把英国信鸽、短面翻飞鸽、鸾鸽、勾喙帕布鸽、球胸鸽、毛领鸽列为同属；特别是那些纯系遗传亚种——他很可能称之为物种——更是如此。

虽然家鸽各个品种之间差异如此之大，但是我相信一般博物学家们的看法：这些家鸽的祖先都是野生岩鸽。野生岩鸽包括几个差异较小的地理品种和亚种。由于导致我相信这一点的几个原因，在某种程度上可以适用于其他情况，因此我想在这里简单概述一下。如果这些家鸽品种不是变种，而且也不是由岩鸽繁衍而来，那它们必然源于至少七八个原种。因为现在已知的家鸽品种非常多，绝不能从少数的原种中杂交而

来。以球胸鸽为例，除非它的祖先有巨大的嗉囊，否则不可能经过杂交产生这样的性状。假定这些原种都是岩鸽，它们不在树上栖息或者生育。然而，除了这种岩鸽和其地域亚种之外，已知的另外两三种野生岩鸽都不具有任何家鸽的性状。如此一来，家鸽的原始种只有两种情况：一是它们依然生存在最初被家养的地方，只是尚未被发现；二是它们已经灭绝了。从它们的大小、习性和显著性状来看，第一点似乎不太可能。但是能够生活在岩壁上又会飞翔的鸟类，不太可能会灭绝。与家鸽习性相似的普通岩鸽，即使生活在英国较小的岛屿或者地中海沿岸，依然没有灭绝。因此假设与岩鸽习性相似的诸多物种已经灭绝，无疑太过草率。而且，上述几个品种的家鸽，曾经被运往世界各地，有一些品种肯定会被带回原产地，但是，除了鸠鸽（一种发生了微小变异的岩鸽）在一些地方回到了野生状态之外，其余品种都没有。另外，经验事实表明，任何野生动物在驯养条件下都很难自由繁殖。然而，基于家鸽多源假说，至少有七八种物种在古代被半开化人彻底地驯化了，这样它们才能在家养状态下大量繁殖。

还有一个重要的可以用于其他情况的论证，虽然上述提到的家鸽品种在体质、习性、声音、颜色及大部分构造上与野生岩鸽大致相同，但是仍然有一些构造差异显著。在整个鸠鸽科中，没有其他品种的喙像英国信鸽、短面翻飞鸽或者勾喙帕布鸽；也没有哪个品种像鸾鸽那样倒生毛，有像球胸鸽那样大的嗉囊，或者像孔雀鸽有那么多的尾羽。如果要承认家鸽的多源假说是正确的，不仅要假设古代半开化人成功地驯化了几种野生鸽子，有意或者无意地挑选出了特征突出的物种，而且这些物种还全部灭绝了或者尚未被人发现。在我看来，这一连串的偶然事件是绝不可能发生的。

关于鸽类的颜色，有几点很值得研究。岩鸽是石板蓝色的，腰部是白色（但印度亚种，即斯特里克兰岩鸽的腰部却是蓝色的），尾部有深色横纹，外侧尾羽基部的边缘是白色的，翅膀上有两条黑纹；但有些半家养和纯野生的品种，除了有两条黑纹之外，还有一些黑色方斑。对于本科的其他任何物种来说，这些特征不会同时出现。但是，现在每个家鸽品种，只要繁育得好，不仅会出现上述斑纹，外尾羽上还会出现白边。而且，把两个或者几个不同品种的家鸽进行杂交，就算它们不是蓝

色或者不具有任何上述特征，它们的后代也很容易出现这些特征。现在我列举几个曾经观察过的实例：我曾经将纯种白色孔雀鸽和黑色勾喙帕布鸽杂交（勾喙帕布鸽很少有蓝色变种，据我所知，英国还未发现），后代有黑色、褐色和杂色的。然后，我又用一只勾喙帕布鸽和一只纯种斑点鸽进行杂交（斑点鸽是白色、红尾，额部有红色斑点），其后代是暗黑色并且带有斑点。接着，我将上面两次杂交的后代进行杂交，产生了一只与野生岩鸽一样拥有石板蓝色、白腰、尾部横纹白边以及翅膀黑纹的美丽后代。如果所有家鸽品种都起源于野生岩鸽，那么我们就可以根据众所周知的返祖原则来解释这一事实了。但是如果我们不认同这一观点，就必须接受以下两种不符合情理的假设之一：第一，假定所有原种都具有与岩鸽相同的颜色和斑纹，因此其任何后代都有可能重现这些颜色和斑纹，但是至今尚未发现任何一个品种拥有这样的颜色和斑纹；第二，各品种（包含纯种）都必须在12代或者至多20代之内同岩鸽杂交过。我之所以指明是12代或者至多20代，是因为目前尚未找到任何一个例子证明，杂种后代可以重现20代以上已经消失的外来血统祖先的性状。对于只与某个独特品种杂交过一次的品种来说，重现任何从这次杂交中得到的性状的倾向都会越来越小，因为外来血统会随着代数的增加而减少。但是，如果没有进行过杂交，那么它们重现前几代已经消失了的性状的趋势就会增强，因此我们可以看到，相反地，这种趋势可能会无限期地遗传下去。论述遗传问题的人常常会将这两种情况混淆。

最后，根据我对不同品种的家鸽的观察，可以断定，所有家鸽品种杂交或者混血产生的后代都是完全能生育的。但是，没有任何实例可以证明，两个完全不同的物种之间杂交产生的后代是可以生育的。一些作者认为，人类长期的驯养可以消除这种强烈的不育趋势。从狗的历史来看，我认为这个假设可以适用于亲缘关系密切的物种。但是如果这个品种的范围延伸得太远，假设像信鸽、翻飞鸽、球胸鸽和孔雀鸽那样差异显著的物种，进行杂交之后依然能够产生可以生育的后代，那未免太过轻率了。

综上所述：人类不可能曾经驯养七八种假定的家鸽原种，并让它们在家养状态下自由繁育；这些假定的家鸽原种从未在野外被发现，并且也没有家鸽回归野生状态；虽然这些假定物种在很多方面与岩鸽相似，

但与其他家鸽种类相比，仍然有着巨大的差异；不管是纯种的还是杂交后代，都可能偶尔出现蓝色和黑色的斑纹；杂交后代完全可以生育。综合以上理由，我们可以得出结论：所有家鸽品种都来源于岩鸽及其地理亚种。

为了证明上述论点，我还可以补充几点。第一，事实证明，野生岩鸽在欧洲和印度都曾被驯养，其习性和构造与所有的家鸽品种基本是相同的；第二，虽然英国信鸽、短面翻飞鸽某些性状与岩鸽差异很大，但是仔细观察这两个品种的一些亚种，特别是从很远地区带回来的亚种，可以发现，它们与岩鸽之间有一个近乎完整的演变序列，其他品种也可能会出现类似情况，但不是所有都是如此；第三，最容易变异的性状往往是这个品种中最显著的性状，比如信鸽的肉垂和喙都比翻飞鸽的长，孔雀鸽的尾羽数目比其他家鸽要多。当我们谈到“选择”时，便会清楚为何会如此；第四，鸽子在全世界都受到广泛关注，并且被人们喜爱和保护，世界各地驯养鸽子的历史都有数千年之久。正如莱普索斯教授向我指出的，最早的驯养鸽子记录出现在古埃及第五王朝（前2494—前2345）。但是伯奇先生告诉我，在更早之前的一个朝代的菜单中就曾出现了鸽子。根据普利尼记述，在罗马时期，鸽子的价格非常昂贵，“不仅如此，他们已经达到可以评价鸽子的品种和谱系的地步了”。大约在1600年，印度的阿克巴汗非常喜欢鸽子，在宫中养了20000多只鸽子。宫廷史官写道：“伊朗和图兰的国王送来一些珍贵的鸽子，陛下使各种鸽子种类相互杂交，以前从来没有人使用过这种方法，这让鸽子得到了惊人的改良。”相同世代的荷兰人和古罗马人也同样非常喜爱鸽子。上述史料对于我们解释鸽类的大量变异有重要的作用，我们后面讨论“选择”时就会明白了。同时，我们还可以了解到为什么这些品种会出现畸形。家鸽的配偶终生不会发生改变，这是产生鸽类品种的一种最有利条件，如此一来，饲养在同一个鸽笼的鸽子就不会混杂了。

我在上文对家鸽起源的几种可能性做了论述，但是还不够充分。因为当我第一次饲养鸽子并观察这些鸽子时，清楚地了解它们的繁殖状况，我很难相信它们出自同一个原种，这和博物学家们对许多鸟类得出的结论一样。我曾经与那些家养动植物的培育者交流过，或者拜读过他们的著作，有一种情况我印象非常深刻：所有人都坚信，他们培育的几

个品种不是源自同一个原始物种。我曾经问过一个知名的赫里福德牛的饲养者，他的牛是否有可能源自长角牛，或者跟长角牛是同一个祖先？结果遭到了他的嘲笑。我遇到的养鸽、养鸡、养鸭、养兔的人中，没有一个不深信自己所养的主要品种都是由一个特殊的物种传下来的。范·蒙斯在其关于梨和苹果的论文中表示，他完全不相信这些品种，比如里布斯顿苹果和尖头苹果等品种来源于同一棵树的种子。还有许多诸如此类的例子，不胜枚举。我认为原因非常简单：经过长期的研究，这些品种之间的差异给他们留下了深刻的印象；另外，尽管他们清楚地知道每个品种的细微变异，通过这些细微的差异进行育种并得到了奖励，但是他们完全不懂一般的遗传变异法则，也不愿意去思考这些细微差异是如何累积并慢慢变大的。现在，很多博物学家知道的遗传法则比那些饲养者还要少，而且也不清楚长期演化谱系中的中间环节，但他们却承认很多家养物种来自于同一原种。当这些博物学家们嘲笑“自然状态下的物种是其他物种的直系后代”的观点时，确实应该学习一下什么是谨慎。

古代遵循的选择依据及其效果

现在，让我们简要概述一下，从一个原始种或者多个近缘种进化成家养品种的过程。有些可以归因为外部条件的直接作用，有些可以归因为习性。如果有人以此为依据，来解释拉车马和赛马、灵缇犬和寻血猎犬、信鸽和短面翻飞鸽之间的差异，那未免太草率了。我们可以看到的是，家养动植物最显著的特征之一就是它们的适应能力，这种能力不是为了增加它们自身的利益，而是为了满足人类的要求或喜好。有些对人类有利的变异可能是突然发生的，或者说是一步达成的。例如，许多植物学家认为，带有刺钩的起绒草是任何机械发明都无法比拟的，它是野生川续断草突然变异形成的变种，这个变异可能发生在幼苗时期；矮脚狗和安康羊也许也是同样的情况。但是，当我们对比拉车马和赛马、单峰骆驼和双峰骆驼、适用于耕地或高山牧场以及毛的用途各不相同的绵羊、不同用途的狗类、顽强战斗的斗鸡和很少斗争的品种、不孵蛋的卵用鸡和矮脚鸡、无数农艺植物、蔬菜、果蔬以及园艺花卉，就会发现，它们在不同的生长季节和不同的栽培目的上于人类十分有利，又或者说，它们的美丽让人赏心悦目。我认为，我们不仅要考虑变异这个因素，还要考虑其他因素。我们不能认为所有品种突然都像我们现在看到

的那样完美无缺，实际上，在某些情况下，我们知道这还不是这些品种形成的历史。问题的关键在于人的积累选择作用：大自然赋予了上述所有品种连续的变异，而人类则根据自己的需求来增强这些变异。从这个方面来说，人类创造了有利于自己的品种。

这种选择原理的强大力量不是凭空想象出来的。可以肯定的是，我们有几个杰出的育种家，在他们的一生中，很大程度地改进了一些牛羊的品种。为了充分了解他们所做的事情，非常有必要阅读专门针对该主题的诸多论文，同时对动物做出实际的考察。饲养者们常说，动物的身体构造具有很强的可塑性，几乎可以按照他们的意图随意塑造。在篇幅允许的范围内，我会引用一些权威作者关于该问题的相关文献。尤亚特可能比其他任何人都了解农学家的工作，而且他本人还是一位优秀的动物鉴定家，谈到人工选择的原则时，他说："这些农学家们的选择不仅改变了整个家畜群体的性状，甚至可以让它们发生彻底的改变。这就像魔术师的魔杖，可以将生物塑造成任何他们想要的形式和模样。"萨默维尔勋爵谈到饲养者对绵羊所做的贡献时，他说："似乎他们已经将一种完美的模型粉刷在墙上，然后再赋予它们生命。"在萨克森州，人们充分认识到人工选育对美利奴绵羊的重要性，于是他们将此当成了一个行业：他们像鉴赏家鉴赏画作一样，把绵羊放在桌子上进行研究；他们每隔几个月进行一次，并将绵羊进行标记和分类，如此连续三次，从而最终选择出最好的绵羊进行繁育。

英国饲养家获得的成就可以从优良品种的高昂价格得到证明，这些优良品种已经被引进到世界各地。总体而言，这种改良绝不能归因于不同品种的杂交，除了偶尔使用一些近缘亚种进行杂交外，所有一流的育种家都强烈反对这种方法。即便是杂交之后，所做的筛选也比一般情况下更为严格。如果选择仅在于分离出一些特殊的品种进行繁殖，那选择的原理便不值得被认真研究了。人工选择的重要性在于，将变异连续数代在同一个方向上累积，并产生巨大的影响。这些变异非常微小，未经训练的人绝对无法察觉出来。我也曾经尝试过，但是未能觉察出这种细微变异。千万个人中，难得有一个人有足够的眼力和判断力，能够称得上是一个优秀的育种家。哪怕他具有这种天赋，也只有通过多年的潜心研究，并以坚忍不拔的毅力全力以赴，他才能成功。这些条件缺一不

可，否则他一定会失败。人们都坚信，要想成为一个熟练的养鸽者，天赋和多年的经验都是不可或缺的。

园艺家们也同样如此，但是植物的变异往往比动物来得更突然。没有人会认为，我们精选出来的产品是仅由原始种的一次变异形成的。一些确切的资料记载可以证明，举一个简单的例子，普通醋栗的大小是逐渐增大的。如果将现在的花朵与二三十年前画作中的花朵对比，我们会发现园艺家们对花朵进行的惊人的改良。当一个植物品种被培育成熟之后，育种者们并没有选择那些最好的植株，而是拔掉苗圃中那些不符合标准的植株。对于动物，人们其实也是遵循这种原则，因为几乎没有人会粗心到用最差的动物去繁育。

关于植物，还有另一种观察选择累积效果的方法：比较花园中同一物种不同变种花卉的多样性；比较菜园中同一物种不同变种蔬菜的叶子、豆荚、块茎或者其他任何有价值的部位的多样性；比较果园中同一物种不同变种的叶子和花朵的多样性。看看不同甘蓝的叶子有多么不同，而花朵有多么相似；看看不同三色堇的花朵有多么不同，而叶子有多么相似；看看不同的醋栗的果实大小、颜色、性状以及绒毛有多么不同，而花朵有多么相似。以上并不是想说明，当变种的某些方面变异显著时，其他方面就没有任何变异。根据我的观察，几乎或者绝对没有这样的情况发生过。相关变异法则的重要性不容忽视，因为它能确保某些变异的发生。但是，作为一般规则，我毫不怀疑轻微变异的连续选择，无论是在花朵、叶子，还是果实上，都会培育出新的变种来。

在近七八十年里，人们才开始有计划地实践选择原理。许多人一定会怀疑这种说法。近年来，人工选择确实受到更多的关注，并且很多相关的论文被发表，得到的成果也相当迅速且重要。但是，如果把该原理当成是近代才有的一个发现，那未免与事实相差太远了。我可以提供若干古代著作中的事例来证明，人们早就认识到选择原理的重要性了。在英国历史上蒙昧未开化的时代，就已经开始进口各种动物，并且通过法律禁止动物的出口。当时的法律规定：在一定规定的体格大小之下的马匹，需要被销毁处理，这就好像育种师拔除苗圃中不合标准的植株一样。我也在中国古代的百科全书中看到了有关选择原理的详细记载。一些古罗马时代的学者已经清晰拟定了选择的规则。从《创世记》的段落

中可以明显看出，家畜的颜色早在那个时期就已经被人们关注。现代未开化人有时候会将他们家养的犬和野狗杂交，以达到改良品种的目的；古时候的未开化人也是这么做的，正如普利尼的书中介绍的那样。一些南非的未开化人，会把他们的牛按照颜色进行交配，正如因纽特人对他们的雪橇犬一样。利文斯通说，非洲内陆的黑人和欧洲人从来没有过来往，但是他们都同样重视家畜的优良品种。虽然有些事情并没有表现出真正的人工选择，但是却表明在古代，人们就已经很重视家养动物的繁育；而在现代，即使是最落后地区的人们，也注意到了这一点。的确，如果饲养家畜却没有注意到选种，那是一件非常奇怪的事情，毕竟品种优劣性的遗传是如此明显。

无意识的选择

目前，一些杰出的育种专家目标明确，即试图通过有条不紊的人工选择，创造出优于该国现有品种的新品种或者亚种。但是，当我们出于某种目的，尝试繁育出最好的物种时，有时候会无意识地做出某一个选择，这种选择往往更重要。因此，当一个人饲养指示犬时，会竭尽全力想要获得尽可能好的犬只，他会从狗群中挑选最好的狗进行繁育，但是他并不希望借此来永久地改变狗的品种。不过，我毫不怀疑，如果这个过程持续几个世纪，任何品种都会得到改良或者是发生变异，正如贝克韦尔和柯林斯得到的结果。他们采用相同的方法进行实验，只是更加系统性的，通过周密的计划对牛进行实验，最终在他们的有生之年，大大改变了这些牛的体型和品种。除非很早就对这些品种进行实际测量或仔细绘制图纸以供比较，否则这种缓慢而无意义的变化将永远不会被发现。在一些文明程度较低的地区，人们对品种的改进很少，在当地可能会发现一些变异很少或者完全没有变异的个体。我们有理由相信，从查理王时期开始，在无意识的选择下，骑士查理王猎犬已经发生了巨大的变化。一些权威学者深信，雪达犬是直接从西班牙猎犬繁育而来，然后通过缓慢的改变逐渐形成的。众所周知，在18世纪，英国指示犬发生了很大的变化，一般都认为这种变化主要是与猎狐犬杂交造成的。但是值得我们注意的是，变化是在不知不觉中逐渐发生的，而且效果十分显著。尽管西班牙指示犬确实来源于西班牙，但是巴罗先生告诉我，他在西班牙从没有见过一只与指示犬相似的本地狗。

通过类似的选择过程以及精心的训练，英国赛马的速度和体型都超过了亲种阿拉伯战马。因此，按照古德伍德比赛的规则，后者的载重量更受青睐。斯潘塞勋爵和其他人已经证明，与以前在该国饲养的牲畜相比，英格兰的牛的体重和早期成熟度已经大大提高了。如果把现在英国、印度和波斯的信鸽和翻飞鸽的状态，与过去诸多旧著作中记载的相关状态对比，我认为，我们可以清楚地追溯到，它们是如何通过各个阶段不易觉察的微小变异，从而变得与岩鸽差别巨大的。

尤亚特给出了一个很好的例子来说明选择过程的效果。这可以被视为无意识的选择，因为育种者没有预期或者想象过的结果出现了，也就是说，出现了两个新的品系。正如尤亚特先生所言，巴克利先生和伯吉斯先生饲养的两群莱斯特羊，“都是经过50年以上，从贝克韦尔先生的原始种繁育出来的。任何熟悉此事的人都不会怀疑，在任何情况下，饲养者都不会让羊群偏离贝克韦尔先生的原始种纯血统。然而，这两位先生拥有的绵羊之间的差异是如此之大，以至于它们看起来完全是不同的品种。”

如果现在还有特别原始的未开化人，以至于他们从未注意过家畜的遗传特性，当他们遇到饥荒或者灾害时，为了某些特殊的目的，也会将对他们特别有用的动物细心保留下来。如此一来，这些被选择的动物会比劣等动物留下更多的后代。因此在这种情况下，会出现一种无意识的选择。从火地岛的野蛮人身上，我们可以看到动物的价值，在饥荒年代，他们宁愿杀死年迈的妇女，也不愿意杀掉狗，在他们看来，狗比年迈的妇女更有价值。

植物同样也是通过被保存偶然发现的最优个体而逐步得到改良的，不管它们最初出现时是否达到变种的标准，也不管它们是否通过不同的品种或者变种杂交而成，我们都可以清楚地看到这个改良的过程。我们现在看到的三色堇、玫瑰、天竺葵、大丽花和其他植物的变种，比起以前的变种或者亲种，在大小和美观方面都有了巨大的改变。没有人会期望从野生植物种子中得到上佳的三色堇或大丽花，也没有人会期望从野生梨的种子中培育出一流的软肉梨，即使他可以把从果园中得来的瘦弱梨苗培育成佳品。从普利尼的描述看来，虽然人们从古代就已经开始栽培梨了，但那个时候梨的品质却很差。我看到园艺书籍中常对园艺家的

精湛技艺表示惊叹，因为他们从如此低劣的材料中培育出了优良的品种。然而，毫无疑问的是，采用这种技术很艰难，就最终结果而言，几乎都是无意识的。其做法就是：始终选取最著名的品种来种植，当偶然有更好的变种出现时，选择这种变种继续种植，如此循环往复。当古代的园艺师们在种植他们得到的最好的梨时，并不曾想到我们今天能吃到何等美味的梨。今天我们能吃到美味的水果，某种程度上要归功于这些园艺师，因为他们选择并保存了能得到的最好品种。

通过那些缓慢而无意识的积累，我们的栽培植物发生了巨大的变化。我相信，这解释了一个众所周知的事实，那就是：很多时候，那些种植在花园或者菜园里的历史悠久的植物，我们已经无法辨别出其野生的原始物种了。如果人类花了几百年或数千年的时间来改善或改造大量的植物，使其达到目前对人类有用的标准，那么我们可以理解，为何在澳大利亚、好望角或者其他未开化人居住的地方，没有任何值得栽培的植物。在这些地方，天然植物种类繁多，并不是因为奇特的偶然导致了这些地区没有有用的植物，只是因为没有进行连续的选择优化以便品种不断改良，而无法达到家养的程度。

关于未开化人饲养的家畜，有一点不能忽视，他们几乎总是必须为自己的食物而奋斗，至少在某些季节是这样。在环境截然不同的两个地方，体质和构造上稍微有差异的同种个体，通常在一个地方会比另一个地方生长得更好。因此，通过“自然选择”过程（以下将对此进行更全面的解释），可能会形成两个亚种。这也许在一定程度上解释了一些作者的观点，即未开化人所养的变种比文明国度里所养的变种具有更多的真种特征。

显而易见，从人工选择所起的重要作用可以看出，为什么家养品种在构造和习性上都特别符合人类的需求和爱好；同时，也能理解为什么家养品种会频繁出现畸形，它们的外在特征的差异是如此之大，而内部部位或器官上的差异则是如此之小。人们很难甚至几乎不可能对家养品种的内部特征变异进行选择，人类极少注意到内部结构的变异。除非自然首先给了它一些细微的变异，否则人类绝对不可能去选择它。如果不是一只鸽子长出了不同寻常的尾巴，没有人会想要培养出孔雀鸽；如果不是看到一只鸽子长出了异常膨大的嗉囊，也没有人会尝试培育出球胸

鸽。任何性状第一次出现的时候，越是不同寻常，越有可能引起养鸽人的注意。但是，毫无疑问，在大多数情况下，人们刻意想要培育出孔雀鸽的说法都是不对的。最初选择尾羽稍长的鸽子来培育的人，根本不会想象到，经过长期连续的有意或者无意的选择之后，最终鸽子会变成什么样子。也许所有孔雀鸽的始祖都像现代的爪哇孔雀鸽一样，只有14根能微微张开的尾羽；或者像其他特殊品种一样，已经有17根尾羽。第一只球胸鸽嗉囊的膨胀程度，也许仅与现在的浮羽鸽食管膨胀一样，但是现代养鸽者很少注意浮羽鸽食管膨胀这一特征，因为这并不是它的主要特征。

也不要以为要引起鸽友的注意就必须在结构上做一些大的改动：因为他们能察觉非常微小的差异，喜欢新颖的事物是人类的天性，无论多么微小也会得到重视。我们决不能用已经形成的品种的价值标准，来评价它们以前那些微小变异的价值。至今，鸽子可能会并且实际上确实会出现许多细微的差异，但是这些差异会被视作偏离了完美标准的缺陷，从而被放弃。普通的鹅没有出现过显著的变异，因此，图卢兹鹅仅仅是颜色上与普通鹅不同，而且该性状还不稳定，却在最近的家禽展览会上被当作新品种来展示。

我认为这些观点可以很好地解释人们时常会提到的一种说法，那就是，我们对家养物种的起源和演化几乎一无所知。但是，实际上，家养物种就像方言一样，几乎很难说它有一个明确的起源。人们保存并繁育了结构上有些细微差异的个体，或者更多地让最好的动物个体之间进行交配，从而让这个品种得到了改良，改良后的品种就会慢慢在临近地区传播开来。但是，到目前为止，它们几乎没有一个独特的名字，并且仅因其价值不高而被忽略历史渊源。如果按照同样的方式继续，慢慢对它们进行进一步改良，它们将更广泛地传播，就会因为其特点和价值而被承认，然后它们才会获得一个地方性的品名。在半文明国家里，由于交通不便，新亚种的传播速度非常缓慢。一旦新亚种的价值得到了充分认识后，无意识的选择原理会让这些特征继续加强，无论这个特征是什么。品种会随着潮流的变化而兴衰，也会随着文明程度的不同而不同，也许一个地区养的多而另一个地区养的少。但是，由于改良的过程非常缓慢，具有不定性，而且难以察觉，因此很难被记录保留下来。

人工选择的有利条件

现在，我要谈一下人工选择的利弊。高度可变性显然是有利的，因为可以自由选择要使用的材料。即使这种变异只是个别的，也不能忽略，只要加以注意，就能促使变异朝着我们期待的方向慢慢发展。因为满足人类需求和喜好的变异只是偶然会出现，所以需要增加饲养个体的数量来提升变异发生的概率。个体数量的多少对于人工选择是否成功至关重要。根据这一原则，马歇尔就约克郡部分地区的绵羊有个说法，“由于它们通常属于穷人，而且多数都是小规模的，因此永远无法改良。”另一方面，培育了大量同种植物的园艺家，在获取有价值的新品种方面，比一般业余者要更成功。动植物只有在适合它们生长的地方，才能大量地自由繁育。当任何物种的个体稀少时，通常不管其质量如何，所有个体都可以繁殖，这会有碍于人工选择。当然最重要的一点是，人们应该重视动植物的价值，并且密切关注哪怕最微小的品质和构造上的差异。如果不能做到这一点，绝对不会有任何成效。我曾看到有人认真地提出，只有当园艺者开始密切注意草莓时，草莓才发生变异，这是最幸运的。毫无疑问，自开始种植以来，草莓一直都在变异，但那些微小的变异却被忽略了。然而，很快，当园艺者挑选出较大的、成熟较早的或者挂果更好的草莓植株，并从中培育出幼苗，再挑选出最好的种子进行播种（同时辅以种间杂交），于是在最近的三四十年中，许多优良草莓品种被培育出来了。

防止杂交是成功培育新品种的重要因素，至少在有其他品种的地区是这样的。因此，圈养是非常必要的。流浪的未开化人或者在开阔平原地区的居民，很少拥有同一物种的多个变种。鸽子可以终生只有一个配偶，这对鸽友来说是一个极大的方便，因为尽管很多鸽子都混居在同一个鸟舍中，还是可以保证鸽子是纯种。这种情况肯定在很大程度上有利于新品种的改良和形成。此外，鸽子可以大量快速地繁殖，品质低劣的鸽子可以食用，自然很容易就被淘汰了。与此相反，猫是夜行性动物，又很难控制交配，虽然受到妇女和儿童的喜爱，但是却很少有独特的品种能够长久保存下去。我们偶尔看到的特殊品种，几乎都是从其他国家进口的。我毫不怀疑某些家养动物的变异程度要比其他动物小，然而，猫、驴、孔雀、鹅等动物却很少或者根本没有出现特殊品种，主要原因

在于选择根本没有发挥作用：对于猫来说，很难给它们配对；而驴子，数量少且几乎都是被穷人饲养，没有人注意过它的繁育；孔雀由于饲养困难，数量比较稀少；至于鹅，它的主要价值在于肉和羽毛，一般人对其特殊品质没有太大兴趣。正如我在其他地方提到过的，即使家养状态下的鹅产生过微小变异，其品质特征也很难发生变化。

有些学者认为，家养生物的变异会在短期内达到一个极限，此后便不再容易产生变异了。无论如何，贸然下此结论，未免有些轻率，因为在近代，几乎所有家养动植物在各方面都得到了巨大的改良，这说明变异一直在进行。如果断言现在已经达到极限的某些特征，经过数个世纪定型之后无法在新的环境下发生变异，也是草率的。正如华莱士先生所说，变异最终会达到极限，这句话很有道理。例如，任何陆生动物，它们的运动速度都会有一个局限，因为要克服它们自身的体重、肌肉伸缩能力和摩擦力等。但是，与我们讨论的问题有关的一个事实是，同种家养变种，因为人类的注意和选择而发生的每一个性状上的差异，都比同属异种间的差异要大。小圣提雷尔曾经就体型方面证实过这一点，颜色和毛的长度方面也是如此。至于运动速度，则与身体特征有关，例如伊克利普斯马跑得快，拉车马体格健壮，这两种不同的性状是同属中另外两个自然物种无法比拟的。植物也是一样，豆或者玉米的不同变种的种子，其大小上的差异可能都比同属其他物种之间的要大。李子各种变种的果实也是如此，甜瓜则更为显著。还有很多例子，不胜枚举。

现在，我们来总结一下家养动植物的起源。我认为，生存条件对生物变异至关重要，它既可以直接作用于生物的构造，又会对生殖系统产生间接影响。如果说在任何情况下，变异都是天赋的和必然的，这种说法我不太认同。遗传和返祖的力量决定了变异能不能持续下去。变异性受很多未知法则的影响，特别是生长的相关性。一部分可以归因为生存条件的直接作用，还有一部分可以归因为器官的使用与否，因此，最终结果将无限复杂。在某些情况下，我毫不怀疑，不同原种之间的杂交对新品种的产生起了巨大的作用。在某些地区，当人们培育出了几个新品种，经过偶尔的杂交，然后再进行人工选择，毫无疑问，会在很大程度上有助于新亚种的产生。但是我相信，不论是动物还是用种子繁育的植物，杂交的重要性都被夸大了。对于通过扦插、嫁接等方法进行临时繁

育的植物来说，不同品种之间杂交的作用非常大，因为培育者不用考虑杂种和混种的变异性和不育性。但是，不用种子进行繁殖的植物对我们来说并不重要，因为它们仅仅是暂时存在的。在所有这些导致变异的原因中，我坚信人工选择的累积作用，无论是系统而快速的，还是无意识且缓慢的，迄今为止，它们都是形成新物种的主要力量。

第二章：自然状态下的变异

变异性

在将上一章中提出的原理应用于自然状态的生物之前，我们必须简短地讨论一下这些生物在自然状态下是否容易发生变异。为了正确对待这个问题，我们必须列出一长串枯燥的事实来说明，所以只能留到我将来在其他文章中再讨论。我在这里也不会讨论术语“物种”的各种定义。到目前为止，还没有一个定义能使所有博物学家满意；但是，每个博物学家在谈论物种时都隐约知道它的意思。通常，该术语包含一种独特创造行为的未知元素。“变种”一词几乎同样难以定义；它差不多普遍是指含有共同的血统关系，尽管这一点很难被证明。另外，所谓“畸形”也是这样难以定义，只不过慢慢演变成了变种。我认为，“畸形”是指某个物种的一部分结构上有相当大的偏差，这种偏差对物种本身有害或者无用，并且通常不会遗传。有些学者会从技术角度来使用“变异”这个术语，通常直接暗示由于生活的物理条件而发生的直接改变；从这个角度来说，“变异”是不能遗传的。但是谁能说，波罗的海的半咸水域中贝壳的矮化现象、阿尔卑斯山顶植物矮小的状态以及在极北地区动物皮毛较厚的情况，不会遗传数代呢？在这种情况下，我认为这些生物都应该被称为变种。

在一些家养生物中（特别是植物），我们偶尔会看到突然发生的结构上的巨大差异，这些差异会不会一直遗传下去，我们还不清楚。几乎所有生物的每一个器官，都能很好地适应其生活的环境。任何一个器官都不是突然出现的，就好像人类发明的机器一样，不能一下子就变得完美。家养状态下的生物有时候会生出畸形，而这些畸形却与其他物种的正常构造相似。例如，有时候母猪会生下长鼻子的小猪。假如同属中曾经有其他野生种自然地长出过长鼻子，那么小猪的长鼻子可能是以一种畸形状态出现的；但是我努力搜寻过，并没有找到近缘种有正常的构造与之相似，而这正是问题的关键所在。如果在自然状态下，这种畸形类

型确实出现过，并且它们可以繁育（通常是不能的），那么，由于这种情况出现的概率极小，必须有一个极为有利的环境才能保留下来。而且，在此后的数代，它们都会和没有畸形的普通类型杂交，这样它们的畸形特征在数代之后就会无法避免地消失。对于单独或者偶尔出现的变异的保存和延续，我将会在下一章谈到。

个体差异

有许多细微的差异，我们都可以称为个体差异，例如经常出现在同一个父母不同后代中的微小差异，或者是居住于相同地区的、有相同祖先的同一物种的个体中，我们观察到的微小差异。没有人会设想，同一物种的所有个体都如同用一个模具铸造出来的一样。这些个体差异对我们非常重要，因为它们为自然选择提供了积累的材料，就像人类可以在任何给定的方向上积累其驯化产品中的个体差异一样。这些个体差异通常会影响博物学家认为不重要的器官，但是我可以通过一长串的事实证明，同一物种不同个体之间的差异，无论是从生理学还是分类学的角度来看，被影响的器官肯定是重要的。我坚信，最有经验的博物学家会对变异案例的数量之多感到惊讶，变异甚至会发生在重要构造器官部分；这些案例可以在很长一段时间里通过相关资料来搜集，正如我所做的那样。应当指出的是，分类学家们并不太乐意在重要特征中发现变异，而且没有多少人会费力地检查内部重要器官，并在许多相同物种的不同个体间进行比较。我从来没想到，靠近昆虫的大中央神经节的主要神经分支在同一物种中也会发生变异。我曾经认为，这种性质的变异只能缓慢地实现。但是，拉伯克爵士已经证明了，介壳虫主要神经的变异程度几乎可以与树干分支的不规则程度相提并论。我还想补充的是，这位富有哲理的博物学家还指出，某些昆虫幼体内的肌肉排列很不相同。当一些学者声明重要器官绝对不会发生变异时，通常会使用循环推理的论证法，因为这些学者会把没有发生变异的器官当成重要的器官（正如一些博物学家自己承认的）。从这种观点出发，当然找不到任何重要器官发生变异的实例。但如果从其他角度来看，肯定有许多重要器官发生变异的实例。

在我看来，有一个与个体差异有关的问题是极为令人困惑的：那些

被称为多型或者变型的属，物种内表现出极大的变异；对于其中一些类型，到底是将其列为物种还是列为变种，几乎没有博物学家的意见是一致的。我们可以列举出植物中的悬钩子属、蔷薇属、山柳菊属为例，也可以列举出昆虫类和腕足类中的一些属。在大多数多型属的物种中，有一部分特征是固定的。除了少数例外，在一个地区中具有多型性的属，在其他地区也会有多型性，同样，从腕足类的壳来看，它们从古代已经是如此了。这些事实非常令人困惑，因为它们似乎表明这种变异与生存条件无关。对于这一观点我持怀疑态度，我们在这些多型属生物中发现的结构上的变异，对物种本身既没有益处也没有坏处，因此自然选择没有对它们起作用，下文我将对此进行说明。

众所周知，同种生物的不同个体之间，往往还存在着与变异无关的巨大差异。例如动物的雌雄个体之间，昆虫的不育雌虫（即工虫）的两三个不同职级之间，以及许多低等动物幼虫和未成熟个体之间表现出来的巨大差异。此外，在动植物中，还存在二型性和三型性的现象。近几年，华莱士先生注意到了这一问题，他举例说，马来群岛某种蝴蝶的雌性个体，有规则地出现了两种或者三种有明显差异的类型，而且并没有出现中间变种。弗里茨·米勒在谈到某些巴西雄性甲壳类动物时，曾讲述了类似的，甚至更为异常的情况。例如异足水虱的雄性，常常有规律地出现两种不同的类型：一种有着形状各异且强有力的螯足，另一种生有布满嗅毛的触角。虽然在大多数动植物中，它们表现出来的两三个类型之间没有过渡的中间类型，但是这种中间类型曾经也许存在过。据华莱士先生描述，在某一岛屿上的蝴蝶，变种很多，甚至能够组成连续的系列；而这个系列两个极端的类型，与栖息在马来群岛上的一个近缘二型性物种类似。蚁类也是如此，一般情况下，不同职级的工蚁有着很大的区别；但是随后我们要讲到，在某些例子中，这些职级是由一些有细微差别的中间类型连接起来的。根据我的观察，某些二型性的植物也是如此。同一类型的雌蝶，在同一时间内，可以生产出三个不同的雄性类型和一个雌性类型；一株雌雄同体的植物，能在同一个蒴果内，产出三种不同类型的雌雄同株的个体，而且这些个体中还包含着三种不同的雌性和三种或六种不同的雄性。这些事实初看的确非常奇特，但也只不过是将以下这个普通事实夸大了，即雌性产生的雌雄后代，彼此间的差异有时会达到惊人的状态。

可疑物种

有些类型具有物种的特征，但是它们与其他类型极其相似，或者有一些中间类型与它们联系非常紧密，因此博物学家们不愿意将它们归类为不同的物种。在某些方面来说，这些连续性的类型对我们来说是最重要的。我们完全有理由相信，很多分类可疑又极其相似的类型，它们的特征在很长一段时间内都在生活的区域得到了保留，就像我们知道的那些良好的物种一样。事实上，当一个博物学家把两个类型通过中间类型联系起来时，他会将其中一个类型视为另一个类型的变种。他会将最普通的最早出现的那个类型描述为物种，而另外一个则视为变种。在决定是否将一个类型作为另一个类型的变种时，有些情况下会非常困难，即使在它们之间有中间类型可以连接，而且这些中间类型通常被认为是变种，也不一定能消除这种困难，在这里我就不一一举例了。但是，在很多情况下，一种类型之所以被认定为另一个类型的变种，实际上并不是因为已经找到了中间类型，而是通过类推，假设它们现在在某个地方存在着，或者曾经可能存在过。而这样，也就为怀疑和猜想打开了一扇大门。

因此，在确定某种形式应归为物种还是变种时，博物学家的判断力和丰富经验似乎成为理应遵循的唯一标准。但是，在许多情况下，必须综合大多数博物学家的决定，因为曾经有很多特征显著而且被人熟知的变种被几个著名的鉴定家列为物种。

毫无疑问，这种性质令人怀疑的变种并非罕见。比较不同植物学家绘制的大不列颠、法国或者美国的植物志，我们会发现，很多被一个植物学家列为物种的类型，却被另一个植物学家列为变种，而且数量多到令人惊讶。在这方面，我非常感谢沃森先生，他曾在多方面协助过我，他为我列举了182种不列颠植物，这些植物通常被认为是变种，但是都曾被植物学家列为物种；在列出此清单时，他省略了许多微不足道的变种，尽管这些变种的变异如此微小，仍然有植物学家将它们列为物种。除此之外，沃森先生完全删除了几个高度多型性的属。在包含最多多型性类型的属之下，巴宾顿先生列出了251种物种，而本瑟姆先生仅列出了112种，其中可疑类型数目之差竟然有139种之多！对于那些通过交配

来生育并且具有高度活动性的动物来说，有些类型常常被某些动物学家列为物种，却被另外一些动物学家列为变种；这种情况在同一个地区比较少见，但是在彼此隔离的地区却很普遍。在北美和欧洲，有多少鸟类和昆虫彼此之间有细微的差别，它们被一位著名的博物学家列为物种，而被另一博物学家列为变种，或者被称为地理亚种！在华莱士先生的几篇有价值的论文中提到，栖息在大马来群岛的鳞翅类动物可以分成四种类型：变异类型、地方类型、地理亚种和物种。在同一个岛屿上，变异类型具有多变性。地方类型则相当稳定，但是在各个隔离的岛上却不相同。如果将所有岛上的类型放在一起比较，就会发现除了极端类型之外，其他类型之间的差异非常微小，因此我们很难区分和描述它们。地理亚种是性状非常稳定、完全隔离的地方类型，但因为彼此之间性状上没有显著或者重要的区别，所以只能凭借个人经验去判断哪个是物种、哪个是变种。最后，在各个岛屿的生态结构中，代表性物种与地方类型和地理亚种占据相同的地位，但是由于它们彼此之间的差异比地方类型或者地方亚种之间的差异要大得多，因此博物学家们普遍把它们称作真正的物种。尽管如此，对于如何区分变异类型、地方类型、地理亚种和物种，我们还没有一个确切的标准。

许多年前，当我比较加拉帕戈斯群岛各个岛屿上的鸟类，并且参考其他学者进行过的比较，我惊讶地发现，它们彼此之间以及和来自美洲大陆的鸟类之间，物种和变种之间的界限是如此随意和模糊。在沃拉斯顿先生的著作中，在马德拉群岛上的很多昆虫都被定义为变种，但是毫无疑问，其他昆虫学家们会将这些昆虫列为不同的物种。甚至在爱尔兰也有一些动物，现在我们通常将其视为变种，但曾经也有一些动物学家将其列为物种。几位最有经验的鸟类学家认为，英国红松鸡只是挪威物种的一个有明显特征的种族，而更多的鸟类学家则认为它是大不列颠的一个特有物种。两种可疑类型之间的产地距离过于遥远，导致很多博物学家将它们定义为不同的物种；但是，多远的距离才能算是足够划分两个物种的距离？如果美洲与欧洲之间的距离足够远，那么欧洲大陆与亚速尔群岛、马德拉群岛、加那利群岛或爱尔兰之间的距离是否足够远呢？小群岛的几个小岛之间的距离又是否足够远？

美国著名的昆虫学家沃尔什先生，曾将食用植物的昆虫叫作植食性

物种和植食性变种。大多植食性昆虫通常只食用同一种或者同一类植物，但是有一些植食性昆虫会不加区别地食用多种植物，而且这些昆虫并不会发生变异。沃尔什注意到，那些食用不同植物的昆虫，在幼虫期或者成虫期，或在这两个时期中，在色彩、大小、分泌物等方面都表现出了微小且固定的差异。这些差异有时候只限于雄性，有时候则雌雄两性都有。如果此类差异非常显著，而且不论是雌性还是雄性、幼虫期还是成虫期，都会出现，那么所有的昆虫学家都会将这些类型定义为物种。但是，将一个类型定义为物种还是变种，不同的人观察会得出不同的结果。沃尔什先生把那些可以自由杂交的类型定义为变种，不能杂交的类型定义为物种。但是，上述差异的形成，是由于昆虫长期食用了不同的植物，所以现在我很难找到中间类型。如此一来，博物学家们在将这些可疑类型进行分类时，就失去了最好的依据。生活在不同大陆或者岛屿中的同属生物，一定也存在这种情况。另外，一种动物或者植物，如果普遍存在于同一大陆的不同区域或者同一群岛的不同小岛上，而且在各地都有不同的类型，人们就可能找到两种极端类型的中间类型，而这种类型就被降级为变种了。

少数博物学家主张动物不存在变种，他们认为极微小的差异也具有物种的价值。如果在两个相距遥远的地区或者两个地层中存在着两个相同的类型，他们也认为那是两个外观相似的不同物种。如此一来，物种这个术语就成了毫无意义的抽象名词，它表示或者假定了独立创造的作用。我们必须承认，许多被优秀的鉴定家判定为变种的类型，都拥有如此完美的物种特征，以至于另外一些鉴定家们将它们判定为真正的物种。但是，在这些术语的任何定义尚未被普遍接受之前，讨论它们是应该被称为物种还是变种，都是徒劳的。

许多特征明显的变种和可疑物种的情况都值得我们认真考虑，为了确定它们的等级，人们已经从地理分布、类似变异、杂交等方向展开了讨论。由于篇幅的限制，我在这里不再过多讨论。在大多数情况下，密切调查将使博物学家就如何对可疑类型进行分类达成一致。但是必须承认的是，在研究得最透彻的地区，我们发现的可疑类型的数目是最多的。令我震惊的是，在自然界中，如果有任何一种动植物对人类非常有用，或者由于某种原因引起了人类的极大关注，那么几乎它所有的变种

都会被记录下来。而且，这些类型通常会被某些作者列为物种。以普通栎树为例，人们对它的研究已经相当精细了。然而，有一位德国学者竟然将它分成了12个以上的物种，但是这些通常被认为是变种。在英国，即使是最权威的植物学家和实践经验丰富的人，对于无梗和有梗的栎树是不同的物种还是变种，也没有得出一致的结论。

在这里，我想讨论一下德康多尔发表的一篇关于各种栎树的著名报告。在辨别物种方面，从来没有人像他一样，拥有如此丰富的材料，并且热情和敏锐地进行研究。首先，他详细地列举了若干物种在构造上的诸多变异，并且计算出了变异的相对频数。他甚至能在同一个枝条上发现12种以上的变异特征，他指出，这些变异特征中，有的和植物的年龄或者生长环境有关，有的起因不明。正如阿萨·格雷所说，这些特征没有什么物种价值，它们一般已经具有确定的物种定义。德康多尔还说，如果某一类型具有在同一植株上永不变异的特点，而且此类型和其他类型没有中间类型，他就会将这一类型定义为物种。这正是他努力研究后得到的结果。此后，他又强调指出："有些人以为大部分物种都具有明确的界限，而可疑物种仅仅只是少数，这是不对的。只有当我们对一个属的了解有限，而且它的物种的建立是基于少数几个样本，即被假定的时候，这个说法才成立。随着我们对该属的了解加深，有越来越多的中间类型出现时，对物种界限的怀疑也会增加。"他又补充说，我们越熟悉的物种，出现的自发变种和亚变种就越多。例如，夏栎有28个变种，除了其中6个外，其他变种的特征都围绕着有梗栎、无梗花栎和毛栎这三个亚种展开。现在，连接这三个亚种的中间类型很少。就如阿萨·格雷所说，一旦这些中间类型灭绝，这三个亚种间的关系就会变得像夏栎周围那四五个假定物种一样。最后，德康多尔承认，他列举的300多个栎科物种中，至少有2/3是假定物种。也就是说，它是否真正满足物种的定义，我们也不清楚。需要注意的是，德康多尔已经不再认为物种是不变的创造物，他相信物种进化论是最符合自然规律的，"而且更符合古生物学、植物地理学、动物地理学、解剖学和分类学等方面已知的事实。"

当一个年轻的博物学家开始研究一个他从未了解过的生物群体时，最让他感到困惑的是，什么样的差异会被认定为物种，什么样的差异又会被认定为变种。因为他不知道他研究的生物产生的变异种类和数量，

至少，这说明变异普遍存在。但是，如果他将注意力集中在某一地区的某一生物上，他很快就会发现如何对这些可疑类型进行分级。最初，他一定会列出许多物种，很快，就像之前提到的喜爱养鸽子或者家禽的人一样，他持续研究的那些类型之间的巨大差异，会给他留下深刻的印象。而且，因为他对其他地区其他生物群的类比变异知识不甚了解，这会导致他很难校正最初印象。随着观察范围的扩大，他将遇到更多困难，因为会有更多相似的类型出现。但是，如果观察范围继续扩大，他最终会做出决定，确定哪些是物种、哪些是变种。他如果想要成功，就必须承认变异的大量存在。并且如果他承认了这一真理，就必然会经常受到其他博物学家的质疑。此外，如果他研究的类型来自不同的地区，在这种情况下，他很难找到可疑物种的中间过渡类型，他将不得不几乎完全依靠类推，而此时就是他极度困难的时候。

当然，物种和亚种之间还没有明确的界限。有些博物学家认为，亚种是非常接近物种，但是却还没有完全达到物种等级的类别。同样，在亚种和显著变种之间，或者在不显著变种和个体差异之间，也没有明确的界限。这些差异混合在一条不甚明显的系列中，而这个系列让人们意识到了生物的演变过程。

因此，尽管分类学家们对个体差异没什么兴趣，但是我却认为它们非常重要。这些微小差异，正是迈向轻微变异的第一步，尽管这些有着微小变异的变种，几乎不值得被自然历史记录。我认为，无论何种程度的变种，都是更明显、更固定变种的基础，然后在此基础上走向亚种，最后变成物种。在某些情况下，从差异的一个阶段过渡到更高阶段，可能仅仅是由于两个不同区域中不同物理条件的长期持续作用；但是更重要和更能适应的性状，应该归因于自然选择对某些确定方向上的结构差异累积（以下将做更全面的解释）的作用，以及器官的使用或者不使用造成的结果。因此，一个显著的变种可以被称为初期物种；这个观点是否合理，还需要通过本书列举的各种事实和论点来做判断。

我们不必假设所有的变种或初期物种都会达到物种等级，因为它们可能在初始状态下灭绝，也可能一直以变种的形态存在下去。例如沃拉斯顿先生列举的马德拉岛某些陆地贝壳变种的化石，或沙巴达列举的植物变种的例子等，都是这种情况。如果一个变种蓬勃发展，超过了其父

本物种的数量，它就可能会被列为物种，而其父本物种则会被降级为变种；变种甚至可能取代并消灭亲本物种；也许两者可以作为两个独立物种继续共存下去。这一点，我将会在后文提到。

综上所述，我认为“物种”这一术语，是为了方便区分一组彼此相似的个体而随意使用的，并且它与术语“变种”没有实质性的区别。“变种”是指差异不明显和性状不稳定的类型。而且，与单纯的个体差异相比，所谓的“变种”也是为了便于区分而被随意使用的。

分布广、扩散大的常见物种，更容易发生变异

从理论的角度出发，我认为，如果把一些著名的植物志中所有变种列表汇总，对于物种的性质和相互关系，可能会得出一些有趣的结论。初看起来，这项工作似乎很简单；但是沃森先生在这个问题上给了我很多宝贵的建议和帮助，让我知道了做这件事情有多困难，就像后来的胡克博士说的一样，他的措辞甚至更加严厉。我将在以后的作品中提出对这些困难的讨论，并会用表格列出不同变异物种的比例数。在仔细阅读了我的手稿并检查了表格之后，胡克博士允许我做出补充，他认为以下陈述是相当正确的。但是，要论述的问题是相当复杂的，而且由于“生存斗争”“性状分歧”以及一些其他问题是无法避开的，所以在此只能简单地叙述一下。

德康多尔等学者已经证明，生长范围广的植物通常都具有变种。我们可以预料的是，广阔的生长范围，让植物处于不同的物理环境之下，而且要和各种生物群进行竞争（这一点与自然条件同样重要，也许会更重要，以后我们将会提到）。但是我的图表进一步表明，在任何有限的区域内，最常见的物种（个体最多的物种）以及在本土范围内最分散的物种（分散和分布广意义不同，不用于一般常见的含义），往往更容易产生显著变异，因而会被植物学家记录在他们的著作中。因此，这是最繁茂的物种，也就是所谓的优势物种（分布在世界各地，扩散最大，个体数量最多），往往会产生显著的变种，或者，就我而言，它们是初期物种。也许这是预料之中的，因为作为变种，为了永久地存在，它们必须和本土的其他生物斗争。已经占优势的物种将最有可能产生优秀的后代，尽管这些后代在某种程度上已经发生了变化，但是它们一定会继承

亲本用来战胜其他物种的优势。这里所说的优势，是指相互竞争时，不同类型的生物具有的优点，特别是同属或者同类具有相似生活习性的生物的优势。关于个体数目的多少以及是否常见这个问题，仅是针对同类生物而言。比如，当一种高等植物，在数量和扩散程度方面都超过了同一地区相同条件下的其他植物时，它就具有了优势。虽然在同一水域中，水绵和寄生菌的个体更多，扩散更大，但是这种高等植物依然占有优势。如果水绵和寄生菌在这些方面都超过了其同类，那么它们也就具有了一定的优势。

各地区较大属内的物种比较小属内的物种变异更频繁

如果把任何植物志中生活在同一地区的植物划分为两个数目相等的群，把较大属的放在一个群，较小属的放在另外一个群，在较大属的群中，我们将发现大量非常常见且扩散大或占优势的物种。同样，这可能是预料之中的，因为如果一个地区一个属类的物种众多，那说明该地区存在有利于这个属发展的有机或者无机的条件。因此，我们可能期望在包含许多物种的大属内找到大量的优势物种。但是，有太多原因会让结果不如预期的那样显著。令我感到惊讶的是，图标显示，大属拥有的优势物种仅略多过小属。在这里，我要指出两个原因：淡水植物和咸水植物通常分布广、扩散大，但这似乎与它们的生长环境有关，与该物种所在属的大小没有关系；通常，低等植物比高等植物更加容易扩散，这和属的大小也没有密切关系。在地理分布的章节中，我们将会讨论低等植物分布广泛的原因。

从把物种视为仅具有显著特征和界限分明的变种的观点中，我推想到，每一地区内，较大属的物种都比较小属的物种更容易产生变种。对于已经形成许多近缘物种（即同一属的物种）的地方，按照一般规律，通常应有许多变种或初期物种正在形成，例如在有许多大树的地方，我们会期望可以找到幼苗。在通过变异形成了许多物种的地方，各种条件对于变异必定是有利的，因此我们可以预期这些条件仍然会有利于变异。从另一方面来说，如果我们把每个物种看作独立创造的行为，那么，就没有明显的理由说明，为什么包含物种多的生物群产生的变种会比包含物种少的生物群多。

为了检验这种推想是否正确，我曾经选择了12个地区的植物和两个地区的鞘翅目昆虫，分成两个数量大致相等的组进行研究，我把大属的物种放在一个组，小属的放在另一个组。然而事实证明，较大属的一组出现变种的比例，比较小属的一组更高；而且较大属一组产生的变种的平均数，也比较小属的一组要大。我曾经采取另外一种划分的方法，把那些只包含一到四个物种的最小的属去掉，得到的结果依然与之前相同。这些事实，对于物种仅仅是极显著的永久变种这一观点很有意义。因为只要有许多同属物种形成的地方，或者我们可以这么说，在物种制造很活跃的地方，我们通常可以发现，现在物种制造依然非常活跃，因此有充分的理由相信制造新物种的过程是缓慢的。如果将变种视为初期物种，那么上面的观点肯定是正确的。因为我的图表清楚地指明了一种规则，任何一个地方，只要一个属中有多个物种形成，那么这个属的物种将会有很多变种（即初期物种）产生，而且其数目会超出平均水平。这并不是说一切大属的都会出现大量变异且物种的数目仍然在增加，也不是说小属的变异很少不会有物种增加。因为如果真的是这样，那我的理论将会遭到致命的抨击。因为地质学清楚地告诉我们，随着时间的流逝，小属规模通常会大大增加；而大属常常会在达到顶峰后衰落并消失。我们想要说明的是：在已经形成了许多物种的属内，许多新的物种仍在形成之中。

与物种内变种之间的关系类似，一个大属内的许多物种也有不同程度的密切相关性，而且在分布上有局限性

在大属内的物种和变种之间还存在其他关系，值得我们注意。我们已经看到，没有任何准确可靠的标准可以区分物种和显著变种，因此当无法在可疑类型之间找到中间类型时，博物学家被迫根据它们之间的差异量来确定，通过类比判断该数量是否足以将其中一个或两个都提升至物种等级。因此，差异量是确定两种类型应被列为物种还是变种时非常重要的标准。现在，弗赖斯谈到植物时以及韦斯特伍德谈到昆虫时，他们都指出，大属中不同物种之间的差异量通常都非常小。我努力通过平均值来验证这一说法是否正确，最终证实了这一观点。我还咨询了一些睿智而有经验的观察员，经过仔细考虑，他们也同意了这一观点。因

此，就这方面来说，大属内的物种比小属内的物种更像变种。或者我们可以用另一种方法来进行说明，可以这么说，在较大属中，不仅有大量的变种以及初期物种正在形成，而且在已经形成的物种中，仍然有一些和变种相似。因为这些物种中间的变异量，比一般的物种间的变异量要小。

而且，一个大属内物种间的关系，就像一个物种的不同变种之间的关系一样。没有一个博物学家会认为，一个属的所有物种间的区别都是一样的。它们通常可以分为亚属、组或更小的单位。正如弗赖斯所说的，小群的变种通常像卫星一样，聚集在其他物种周围。什么是变种？变种不就是围绕在亲种周围、彼此间关系亲疏不等的类型吗？毫无疑问，变种和物种之间有一个重要的区别，那就是，变种之间的差异或者变种和亲种之间的差异，远小于同属物种之间的差异。但是当我们讨论我所说的“性状分歧”这个原理时，我会解释这一点，同时我还会解释变种之间的较小差异，是如何发展成为不同物种之间的差异的。

在我看来，还有另一点值得关注，变种通常有很多范围限制。的确，这只不过是说实话而已，因为如果发现一个变种的范围比其假定的亲本物种的范围更广，那么它们的名称就应该互换了。但是我们也有理由相信，那些与其他物种密切相关而且类似于变种的物种，通常在分布范围上也会受限制。例如，沃森先生在经过严格筛选的伦敦植物目录（第4版）中为我标记了63种植物，虽然它们被列为物种，但是因为它们与其他物种很相似，以至于沃森对这些物种的地位产生了怀疑。沃森将大不列颠划分为很多省，上述63个物种平均分布范围是6.9个省；现在，在同一本植物志中记录的53个公认的变种，平均分布范围是7.7个省；而这些变种所述的物种，分布范围是14.3个省。由此看来，公认的变种和沃森先生帮我标记出的那些可疑物种，它们的分布范围是极其相似的，而且这些可疑物种几乎都被英国植物学家认定为真正的物种了。

摘要

变种和物种有很多相似特征，我们很难将它们区别开来，除了以下情况：第一，发现了中间过渡类型；第二，两者之间有若干不定的差异量。如果差异太小，即使两者之间没有发现中间类型，也会被认定为是

变种，但是认定两种形式物种等级必需的差异量是不确定的。在任何一个地区，具有超过平均物种数量的属，这些属的物种也会具有比平均数量更多的变种。在大属中，不同的物种间有程度不同的密切关系，它们会形成一些小群，环绕在其他物种周围。与其他物种密切相关的物种，通常生长范围有限。从上述各方面看来，大属中的物种和变种非常相似。如果物种曾经作为变种存在，并且逐渐有变种发展形成，那么我们就可以清楚地理解物种与变种之间的类似；如果每个物种都是被独立创造出来的，那么上述的类似性就很难解释了。

我们还看到，各个大纲里、各大属中，最繁茂和最具优势的物种，平均而言产生的变种最多；而且在下文中我们会看到，变种往往会转变成新的独特变种。因此，较大的属有变得更大的倾向；在整个大自然中，现在占据优势的生物类型，通过留下大量具有优势的后代，而变得更具有优势。但是，在下文中我们将进一步说明的是，较大的属也有分裂为较小的属的趋势。因此，世界上的生物类型就会一级一级地分下去了。

第三章：生存斗争

在进入本章主题之前，我必须做一些初步说明，以表明生存斗争如何影响自然选择。在上一章中已经看到，处于自然状态的生物，其中一些个体会发生变异。确实，我不知道这曾经有过争议。对于我们来说，将多种可疑类型称为物种、亚种或变种并不重要。例如英国植物中的两三百种可疑类型，它们究竟是哪种等级并不重要，只要我们承认显著变种的存在就可以了。但是，仅仅知道个体变异和显著变种的存在，是本书的基础，却很难解释自然界中物种的形成。各种生物相互适应、它们对生活环境的适应、单个生物和生物之间的适应，为何能达到这么完美的地步呢？例如，啄木鸟和槲寄生，依附于兽毛和鸟羽的低等寄生虫，潜入水中的甲虫的构造以及依靠风力传送的带绒毛的种子等。简言之，完美的适应关系存在于世界上的每一个角落。

再者，可能有人会问，变种最终是如何转变成优质而独特的物种的？在大多数情况下，它们彼此之间的明显差异远远超过同一物种不同品种之间的差异；而构成不同属的物种之间的差异，又远大于同属的不同物种之间的差异，这些种类又是如何形成的呢？所有这些结果不可避免地缘于生存斗争，我们将会在下一章讲解详细内容。由于这种生存斗争，任何的变异，不论多么微小，也不论是出于什么原因，只要在某种程度上对物种的个体有利，就能保护该个体在与其他生物和自然环境的斗争中生存下去，而且这种变异通常会遗传给后代。因此，遗传到有利变异的后代具有更好的生存机会，但是通常只有少数个体可以生存下去。我将这个保存每个微小的有利变异的原则称为“自然选择”，以便与人工选择进行区分。斯宾塞先生更喜欢“适者生存”这个说法，比较方便且更为确切。我们已经看到，人类通过人工筛选，能获得巨大的效益，并且通过自然给予生物的微小变异，使得生物更适于人类的需求。但是，正如我们将在下文中看到的一样，自然选择的力量是强大且永无止境的，人类的力量是无法与其相比较的，就好比自然的艺术和人类的作品一样，有着天壤之别。

现在，我们要更加详细地讨论生存斗争这个问题，在将来的作品中，我会做更加详细的阐述。老德康多尔和莱尔两位先生，曾从哲学方面说明，所有有机生物都面临激烈的竞争。关于植物，曼彻斯特教务长赫伯特以无与伦比的态度和才华对这个问题进行了论述，这显然是因为他对园艺学颇有造诣的缘故。要想在口头上认可生存斗争这个真理并不难，难的是时时刻刻将它记在心中。但是，除非这个观念已经根深蒂固，我相信整个大自然的组成，包括分布、稀少、繁盛、灭绝和变异等事实，都会显得模糊不清或者被人们误解。我们常常在看到丰富的食物时就想起大自然的美好，但是却没有看到或者忘记了，那些在我们周围自由歌唱的鸟儿在食用昆虫和种子时，也是在毁灭其他的生命；或者我们忘记了这些歌唱家们，它们自身、它们的卵，或者它们的雏鸟，也会被猛禽猎食；我们总是忘记，尽管现在食物丰盛，但并非每年都是如此。

广义的生存斗争

首先我要说明的是，“生存斗争”这个词是广义的、含有隐喻的，其意义不仅包含生物个体的生存，还包含着它们之间是否能成功繁育后代。在食物稀缺时，两只狗争夺食物，可以说这是真正的生存斗争。沙漠边缘的植物为抗旱而奋斗，更准确地说，它们是依靠水分而生存。每年生产1000粒种子的植物，其中平均只有1粒种子可以开花结籽。也许可以更确切地说，它是在和遍地生长的同类和异类植物做生存斗争。槲寄生依附于苹果和其他一些树木生存，如果说它们是和寄主做斗争，那只能是牵强附会。因为如果一株树上生长的槲寄生太多，树木也会衰败死亡。在同一个枝条上生长的几个槲寄生幼苗之间的斗争，才是真正的生存斗争。由于槲寄生是由鸟类传播的，因此它们的生存取决于鸟类。用比喻的说法，槲寄生和其他结果实的植物之间也存在生存竞争，因为都需要诱使鸟儿来吞食以便传播它们的种子。在这几种相互交织的意义上，为方便起见，我使用了概括性的说法 ——“生存斗争”。

生物按几何增长的趋势

所有生物都有高速率增加的趋势，这不可避免地导致了生存斗争。

每一个生物，在其自然生命周期内，都会产生若干卵或者种子。在生命的某个周期或者某个季节、某些年份，生物往往会遭受破坏，否则，按照几何增长的原则，其数量将迅速变得过于庞大，以至于没有任何地区可以让它继续生存下去。因此，当生产出的个体过多而无法生存时，无论在什么情况下，生物都必须进行生存斗争，包括相同物种的不同生物个体之间、不同物种之间以及生物与其自身生存的生活环境的斗争。这正是马尔萨斯理论运用于整个动物界和植物界时产生的强大力量。因为在这种情况下，既不会有人为食物增加，也没有审慎的婚姻限制。尽管某些物种在数量上或多或少地增加，但是并非全部物种都是这样，否则这个世界将没有足够的空间容纳它们了。

这一规则没有例外可言，如果所有生物都以如此快的速度自然增长，而且不遭受毁灭性的破坏，即便只是一对生物的后代，也会将整个地球都覆盖。即使是生育率比较低的人类，人口数量在25年之内也翻了一番，以这样的速度，无须千年，人类的后代在地球上就没有立足之地了。根据林奈的计算，如果一年生植物每年只结两粒种子（然而并没有哪一种植物这样低产），那么明年它们会产生两棵幼苗，依此类推，20年内将有100万株植物生成。大象被认为是所有已知动物中繁殖得最慢的，而且，我竭尽全力地估计其可能的最低自然增长率：可以假设它在30岁时开始生育，然后一直持续到90岁，这期间一共生育了6头幼仔；如果真是这样，经过740～750年左右，这对大象就会繁育出1900万头后代。

但是我们有比单纯的理论计算更好的证据，也就是说，在自然状态下，如果接下来两三个季节对它们有利，各种动物的数量会惊人地迅速增长。更令人震惊的是，世界某些地区的家养动物已经开始返回野生状态了。比如南美洲以及最近澳洲的牛和马，繁殖速度本来是比较慢的，如果不是有确凿的证据，我们很难相信它们现在的繁殖速度是如此之快。植物也是如此：以英伦诸岛引进的植物为例，在不到10年的时间里，它们已经遍布全岛成为常见的植物了。现在，拉普拉塔一些从欧洲引进的植物，例如刺菜蓟和高蓟，在南美平原上已经普遍生长了，在数平方千米的地面上，几乎很难看到其他植物。我从福尔克纳博士那里得知，自从美洲被发现后，从科摩林角到喜马拉雅山下，从美洲输入的植

物几乎已经遍布整个印度了。这样的例子数不胜数，没有人会认为这是因为动植物的繁殖能力突然明显增强了。显而易见的解释是，生活环境对它们的生存非常有利，不论老幼都很少死亡，几乎所有年幼的都可以长大并且繁育。在这种情况下，个体的数量呈几何增长，其结果永远是令人惊讶的，这也简单地解释了为什么生物在新的地区会快速增长和广泛传播。

在自然状态下，几乎每一种植物都会产生种子；大多数动物，年年都会交配。因此，我们可以自信地推断，所有动植物都趋于以几何增长，然后迅速地占据所有它们可以生存的地域，而且必然在生命的某个时期遭到破坏以遏制这种几何增长。我认为，我们往往会被大型家养动物误导，我们没有看到它们遭受大的毁灭，但是忘记了每年有成千上万的家养动物被宰杀作为食物，在自然状态下，也会有相同数量的牲畜会因为种种原因而死亡。

每年能产上千种子或卵的生物，与极少繁殖的生物，两者之间唯一的区别就是，在有利条件下，生育率较低的生物需要数年时间才能占据整个地区（假设整个区域较大）。秃鹰每年产2个卵，而鸵鸟每年产20个卵，然而在同一地区，秃鹰的数量可能会比鸵鸟多。暴风鹱一年只产一个卵，但是人们相信它是世界上数量最多的鸟类。一只苍蝇一次可产数百个卵，虱蝇一次只产一个卵，但是这种差异并不能决定同一个地区两种生物数量的多少。由于赖以生存的食物数量经常波动，大量地产卵对有些物种来说具有一定的重要性，因为充足的食物可以使它们的数量急剧增加。大量产卵的真正意义在于，补充某个阶段个体数量的大量减少。对于大多数生物来说，这一阶段是在生命的早期。如果动物能够以任何方式保护自己的卵或幼体，则可能只产少量卵，仍可保持平均数量；相反，如果有许多卵和幼体被毁坏，则需要大量产卵，否则该物种就有可能灭绝。假如有一种树的寿命是1000年，它每1000年只产生1粒种子，假设这粒种子从未被摧毁，并且可以确保它在合适的地方发芽，那就足以保持这种树的数量了。因此，在任何情况下，任何动植物的平均数量仅间接取决于其卵或种子的数量。

我们在审视自然时，有必要始终牢记上述观点——永远不要忘记，周围的每一个生物都正为最大限度地增加数量而努力；每个生命在其生

命的每一个时期都在为生存而进行斗争；在每一代或者每隔一个周期，毁灭性的破坏无可避免地会落到老幼个体上。只要减弱任何一种抑制，或者死亡率稍微降低，物种的数量就会大大地增加。

抑制数量增加的因素

每个物种增加数量是自然趋势，控制这个趋势的因素尚不明确。看看最活跃的物种，它们的数量已经如此之多，并且将以更大的幅度进一步增加。我们竟然无法举出一个例子，来说明是什么因素抑制了其大量增加。但是这并不会令人感到惊讶，因为在整个问题上，我们是多么无知；即使对于人类本身，我们也是如此无知，尽管我们对人类的了解比对其他动物要深刻得多。这个问题曾经被多个学者讨论过，在以后的作品中，我将对抑制生物自然增长的因素进行详细的讨论，特别是关于南美的野生动物。在这里，我只提几个要点，以引起读者的注意。动物的卵或非常幼小的动物似乎通常最容易受到伤害，但并非总是如此。对于植物来说，种子受到的破坏是最大的，但是根据我的观察，在长满其他植物的土地上，刚发芽的幼苗受到的损害最大。此外，幼苗也常常会遭受各种天敌的毁灭。例如，将一块长约0.9米（3英尺）、宽约0.6米（2英尺）的土地翻土除草，以便新生幼苗不会受其他植物的侵害，我将所有幼苗做了标记，结果在357株幼苗中，至少有295株被摧毁，主要是由蛞蝓和昆虫造成的。一块草坪长期被刈割或者经常被放牧，如果让植物在草地上自由生长，生命力较强的植物会逐渐排挤生命力较弱的植物致其死亡，哪怕生命力较弱的植物已经完全长大。例如，在一块约长1.2米、宽0.9米（3英尺乘4英尺）的草地上，生长着20种植物，其中有9种植物被排挤而导致死亡。

当然，每个物种能获得的食物多少决定了物种增加的极限，但是，通常不是获得食物的数量，而是其他动物的捕食情况，决定了一个物种的平均数量。因此，几乎毫无疑问，任何大型庄园里的鹧鸪、松鸡和野兔的数量，主要取决于天敌被消灭的程度。假如在接下来的20年内，英国不再有猎人捕杀猎物，同时也不驱除它们的天敌，尽管现在每年有成千上万的猎物被杀死，但是猎物的数量也有可能会比现在更少。另一方面，在某些情况下，像大象那样的动物，不会被其他猛兽杀害，即使是

印度的老虎，也不敢攻击在大象保护下的小象。

气候在决定物种的平均数量方面起着重要作用，那些极端寒冷或者干旱的周期性季节，最有效地抑制了生物个体数量的增加。我估计1854年—1855年的冬天，在我居住的区域，大约有4/5的鸟类死亡，对于鸟类来说，这是具有毁灭性的。对于人类来说，如果因为传染病造成了1/10的死亡率，就已经是很惨重的事情了。乍一看，气候因素似乎完全不会影响生存斗争；但气候主要起着减少食物的作用，只要是需要同样的食物，不论是同种还是异种生物，气候都让它们之间产生了激烈的斗争。即使在气候直接起作用时，如极端寒冷的气候，首先死亡的仍是那些最弱小的或在整个冬季里获取食物最少的个体。当我们从南到北，或从潮湿的地区到干燥的地区旅行时，总是看到某些物种变得越来越稀少，最后趋于绝迹。由于气候变化明显，我们试图将整个效果归因于其直接作用，但是这种观点显然是错误的。因为我们忘记了，即使在某个物种最繁盛的地方，在其生命的某个周期也会因为敌害的侵袭，或者在同一地方因为食物而导致的同类竞争，而导致个体的大量毁灭。如果这些敌人或竞争对手，气候变化对它们稍微有利，它们的数量就会增加，并且由于每个区域已经有足够的生物个体，那么其他物种必然会减少。当向南行驶并看到某个物种的数量减少时，我们可能会确信，是别的物种占据优势而导致了它们数量的减少。所以，当我们向北旅行时，物种数量减少的程度就比向南要低，所有的物种越向北，数量就越少，竞争者也就随之减少了。向北走或是上山时，比向南走或者下山时，遇到矮小的生物更多，这才是不利气候的直接影响。如果到了北极地区、白雪皑皑的山顶或者干涸的沙漠时，生存斗争的对象就几乎完全是自然环境了。

气候主要是通过有利于其他物种而间接发挥作用，虽然许多移植到花园里的植物可以很好地适应气候的变化，但它们永远不会自然化，因为它们无法与本土植物竞争，也无法抵御本土动物的破坏。

当一个物种由于高度有利的环境而在小范围内数量急剧增加时，往往会伴随着传染病的发生，至少这种情况在狩猎动物时时常发生。这就是一个与生存斗争无关的抑制因素。但是，即使是所谓的传染病，也有一些是寄生虫引起的，可能由于动物的密集性，给寄生虫的传播造成了

有利条件。这样，就形成了寄生虫和寄主之间的生存斗争。

另一方面，在许多情况下，一个物种的数量多于敌害的数量，是保存这个物种的必要条件。因此，我们可以在田间轻松地种植大量玉米和油菜籽等，因为这些种子的数量远大于以种子为食的鸟儿的数量。尽管这个季节的食物丰盛，但是鸟儿的数量也不会大量增加，因为在冬季，它们的数量受到了限制。任何尝试过的人都知道，如果只在花园里种几株小麦或者其他类似的植物，想要收获种子非常困难，在这种情形下，我几乎颗粒无收。同一个物种大量个体的存在，对于物种的保存是非常必要的，我认为，这种观点可以解释自然界中的一些奇异事实。例如一些非常稀有的植物，有时在适合它们生存的少数地方却极为繁盛；又如丛生型的植物，即使在它们生存范围的边界，也依然保持丛生。对于这种情况，我们可能会相信，只有当生存条件如此有利，以至于一种植物可以成群地生长在一起时，这种植物才能免于灭绝。我还想补充说明的是，杂交的好处以及近亲交配的坏处，在某些情况下可能起了作用，但是在这里，我不打算详谈这个复杂的问题。

生存斗争中动植物间的复杂关系

许多记录在案的事例都可以证明，同一地区内互相斗争的生物之间，存在着十分复杂且令人意外的抑制作用和相互关系。我只给出一个实例，尽管它很简单，但是却引起了我的兴趣。在斯塔福德郡，我一个亲戚的土地上，有一片巨大而荒芜的地区，从未被人类耕种过，另外还有几百英亩完全相同性质的土地，25年前被围起来并且种上了苏格兰冷杉。在种植冷杉的那部分土地上，本地植被变化最为明显，即使在两块土质完全不同的土地上，也无法看到如此大的差别。健康植物的比例完全改变了，而且这里还生长着12种荒地上没有的植物（草类不计算在内）。对昆虫的影响一定更大，因为有6种食虫鸟在人工林中很常见，而在荒地上则看不到；而经常来到荒地的两三种食虫鸟，在人造林中也没有见到。在这里，我们看到引入一种树的效果是何等强大，因为当初植树的目的是避免牛群进入，除此之外，我们什么都没有做过。我在萨里的法汉姆，清楚地看到了圈地这一因素的重要性。这里有大量的荒地，远处的山顶上有几株古老的苏格兰冷杉。在过去10年中，大量的荒

地被圈起来，如今，自我繁殖的杉树如雨后春笋般冒出来，它们之间的距离如此之近，以至于不能让所有树苗都成长起来。当我确定这些树不是被人工播种或种植时，我对它们的数量之多感到非常惊讶，于是我又观察了几个地方。我查看了那几百英亩未封闭的荒地，除了以前种植的几棵冷杉之外，几乎看不到新生长出来的冷杉。但是当我仔细观察荒地上的那些树干时，无数树苗和小树都因为被牛啃食而长不起来了。在距其中一个旧冷杉几百码的地方，我在一平方码内发现了32棵小树，其中有1棵，从年轮上来看，已经生长了26年，但是始终无法让它的树干生长得高于其他树木。难怪一旦荒地被围起来，就会长满茂盛的小冷杉。然而，这块荒地荒芜至极，以至于没有人会想到，牛会如此紧密而有效地搜寻冷杉树作为它的食物。

在这里，我们看到牛决定了苏格兰冷杉的存在。但是在世界上的许多地方，昆虫决定了牛的存在。在这一方面，巴拉圭的例子最为奇特。在该地区，从来没有牛、马、狗变成野生的情况，尽管在该地区的南面和北面，都有这些动物在野生状态下成群游荡。阿萨拉和伦格曾经指出，在巴拉圭，有种蝇数量巨大，它们会把卵产在刚出生动物的肚脐中。这种蝇虽然数量巨大，但是它必定也受到了某种抑制，极有可能是受到了其他寄生虫的抑制。因此，在巴拉圭，如果某些食虫鸟的数量减少，寄生性昆虫就会增加，因此在动物肚脐中产卵的蝇的数量则随之减少。然后，牛和马就会变成野生的，这又会极大地改变植被（正如我在南美部分地区观察到的）。紧接着，植被的变化又会影响昆虫，进而影响食虫鸟，这样一来，正如我们在斯塔福德郡所见的那样，复杂关系影响的范围就越来越广了。并不是说，这种关系在本质上可以如此简单。战争之中还有战争，一点细微的差异就足以使一种生物战胜另一种生物且胜负交替。尽管一点细微的差异就足以使一种生物战胜另一种生物，但是从长远来看，各方面的势力是如此平衡，使大自然长期保持统一。我们如此无知，却总是喜欢做出各种推测。当我们听到某种生物灭绝时，会感到惊奇；而且由于我们不清楚灭绝的原因，只能用天灾来解释生命的毁灭，或创造出一些解释生物寿命的规则。

我很想再举一个例子，说明自然界中最遥远的动植物是如何通过复杂的关系网捆绑在一起的。以后有机会我会谈到，在我的花园里，有一

种外来的墨西哥半边莲，昆虫从来没有接触过它。因此，从其独特的结构来看，永远都无法结出种子。几乎所有的兰科植物，都需要昆虫授粉才能受精。我也有理由相信，三色堇一定要依靠野蜂才能受精，因为其他的蜂从来不采它的花粉。根据尝试过的实验，我发现，有些三叶草也必须依靠蜂来传播花粉。例如白三叶草的大约20串花序可以结出2290颗种子，被遮盖起来不让蜂接触的另20串花序就一颗种子也没结。又如，红三叶草的100串花序结了2700粒种子，但被遮盖起来的同等数量的花序也是一颗种子也没结。只有野蜂会来造访红三叶草，因为别的蜂压不倒它的花瓣，就采不到它的花粉。有人认为蛾类也可以帮助三叶草受精，但我对此表示怀疑，因为蛾的重量并不能把三叶草的花瓣压下去。因此，我毫不怀疑，如果野蜂在英国变得罕见或者灭绝了，那么三色堇和红三叶草也会跟着变得罕见或者灭绝。在任何地区，野蜂的数量都取决于田鼠数量的多少，因为田鼠会毁坏蜂房和蜂窝。长期研究野蜂习性的纽曼上校，坚信英国有2/3以上的野蜂窝是被田鼠破坏的。众所周知，现在的鼠的数量很大程度上取决于猫的数量。纽曼先生说：“在村庄和小镇附近，我发现野蜂蜂巢的数量比其他地方都多，这是因为田鼠被大量的猫消灭了。”因此，我们可以确定，如果某一地区猫比较多，通过猫对田鼠、田鼠对野蜂的干预，就可以决定某些花朵的数量。

对于每种物种，在不同的生命时期、不同的季节或年份，都有不同因素在制约着它的兴衰。其中一种或几种因素常常有最有力的作用，但一个物种的平均数量乃至能否生存下去，则是由所有因素综合决定的。某些情况下，同一物种在不同地区，受到的制约作用也极不相同。当我们看到密布在河岸的植物和灌木丛时，常常会将它们的种类和数量比例归因于偶然。但是这是多么错误的看法！每个人都听说过，当美洲的一片森林被砍伐时，出现了不同的植被群落；但据观察，在美洲南部的古印第安的废墟上，当初那里的树木被完全清除过，但是现在，废墟上生长着与周围原始森林相同的美丽植物，在物种的多样性和数量比例方面，两者完全一致。漫长的几个世纪中，每年散播数千种子的树木之间都有着激烈的斗争；在昆虫与昆虫之间，也有着激烈的斗争；在昆虫、蜗牛、小动物、鸟兽之间，同样存在着激烈的斗争。所有生物都在努力增加数量，但是它们又彼此相食，有的吃树木，有的吃种子，有的吃幼苗，有的吃那些刚长出地面会影响树木生长的其他植物。如果我们扔出

几根羽毛，所有的羽毛都会按照明确的规则掉在地上。但是相对无数动植物之间的关系来说，每根羽毛应落在什么地方，就显得十分简单了。在数个世纪的历史中，无数动植物的作用和反作用，决定了在古老的印度废墟上生长的植物的数量比例和种类。

如果一种生物和另一种生物是依存关系，例如某些生物与其身上的寄生虫，通常都是亲缘关系很远的两种生物。但严格来说，有些远缘生物之间也会发生生存斗争，例如蝗虫和食草动物之间便是如此。但是，同一物种的个体之间的斗争几乎总是最激烈的，因为它们经常生活在同一地区，需要同样的食物，并且面临同样的危险。如果是同一物种的变种，斗争通常也同样严重，而且短时间之内就能看到结果。例如，如果把小麦的几个变种混合后一起播种在同一块土地上，然后再将它们的种子继续混合播种，那些最适应该地土壤和气候的，或者天生繁殖力最强的变种，通常会击败别的变种，结更多的籽，几年之后就将取代别的变种。至于那些极度相近的变种，比如不同颜色的香豌豆，它们必须每年单独采摘，然后按适当比例混合种子，否则较弱的变种将稳步减少并消失。绵羊的变种也是如此：有人断言某一种山地绵羊会使另一种山地绵羊饿死，所以它们不能一起放养。把不同变种的医用蚂蟥养在一起，结果也相同。假设在自然状况下，让家养动植物的一些变种进行任意斗争，每年也不按一定比例把种子或幼体保留下来，我们甚至会怀疑，6年后，这个混合群体（禁止杂交）中的这些家养变种，能否完全保持原来的体力、体质及习性和原来的数量比例呢？答案恐怕是否定的。

最激烈的生存斗争存在于同种的个体之间和变种之间

由于同属物种通常（尽管并非总是如此）在习性和体质上是相似的，并且在结构上也相似，因此，当同属物种相互竞争时，斗争通常比不同属的物种之间更加激烈。例如，最近在美国一些地区，一种燕子生存范围的增加，导致了另一种燕子的减少；最近，苏格兰鸣鸫的数量减少了，因为在一些地方，吃槲寄生种子的槲鸫的数量增多了；我们常常听说，在两种极端不同的气候下，一种鼠取代了另一种鼠；在俄罗斯，亚洲小蟑螂入侵后，迅速占领了同属亚洲大蟑螂的地盘；澳洲蜜蜂输入后，小型无刺的本地蜂随即灭绝；一种野芥菜取代了另一种芥菜；此类

情况比比皆是。我们可以隐约地猜测出，在自然状态下，地位相近的近缘物种间生存斗争非常激烈的原因；但是也许在任何情况下，我们都无法准确地说出，为什么一个物种在这场伟大的生存之战中战胜了另一个物种。

我们可以从上述论述中得出一个重要的推论，即生物之间的构造都是相关的，但这种关系通常是隐藏起来的。借助这种关系，它们才能够与其他生物争夺食物，或者躲避其他生物的捕食，又或者捕食其他生物。这在老虎的牙齿和爪子的构造以及附着在老虎皮毛上的寄生虫的足和爪的构造中，都表现得很明显。乍一看，蒲公英美丽的羽毛状种子以及水生甲虫扁平的带缨毛的足，似乎只与空气和水分有关。然而，毫无疑问，羽毛状种子与地面布满的其他植物有着紧密的联系，这样种子就能传播到更远的、没有被其他植物覆盖的地面上去；而水生甲虫，其腿部构造非常适合潜水，更适合与其他水生昆虫竞争，方便寻找自己的猎物，并逃避其他动物的捕食。

初看起来，许多植物种子中积累的营养储备似乎与其他植物没有任何关系。但是，这种种子（比如豌豆和大豆）即使被播种在满是杂草的土地中，其幼苗也能茁壮成长。我怀疑种子中营养的主要用途是促进年轻幼苗的生长，使其能与周围生长旺盛的其他植物做斗争。

看一看处于生长范围中间的植物，为什么它的数目没有增加到两倍或四倍？我们知道它完全可以承受更高温或更低温、更潮湿或更干燥的环境，那么它也完全可以扩展到其他温度和湿度稍高或稍低的地区。在这种情况下，我们可以清楚地看到，如果想要让这种植物有能力增加它的数量，我们必须给它提供一些超越竞争对手或掠食动物的优势。就其地理范围而言，如果因气候的变化而使植物发生体质上的变化，这显然对增加其数量是有利的；但我们有理由相信，到目前为止，只有少数动植物能够在较远的区域生存，仅凭严酷的气候就能将其摧毁。除非达到生存范围的极限，例如北极地区和沙漠地区，否则生存斗争是不会停止的。即使在非常寒冷或干燥的地区，少数几个物种之间或者同种生物不同变种之间，仍然会为了争取更温暖或者更湿润的生活环境而发生竞争。

因此，我们还可以看到，当动植物被放置在新的环境中面对新的竞争对手时，尽管气候可能与以前完全相同，但是，它的生存条件仍然会发生本质上的改变。如果我们希望在新的区域增加它的数量，就得用不同于它原产地的方法来改进它，因为我们必须让它在不同的竞争对手或敌人面前具有一些优势条件。

幻想尝试使一种生物具有超越其他生物的优势，虽然是个好的想法，但是可能在任何情况下，我们都不知道该怎么做才能获得成功。这使我们相信，我们对所有生物之间的相互关系，实在是知之甚少，虽然我们很有必要弄清楚，但是实际上却很难做到。我们能做的，就是牢记：每个生物都在努力以几何增长；每个生物在其生命的某个时期、一年中的某个季节、每一代或每隔一段时间，都必须为生命而奋斗，并随时可能遭受巨大的破坏。当我们反思生存斗争时，可能会充满信心地安慰自己：自然中的斗争不是持续不断的，我们不必感到恐慌，通常死亡是迅速的，强壮、健康、幸运的生物就可以生存并且繁衍下去。

第四章：自然选择即适者生存

上一章我们简单地讨论了，生存斗争是如何对物种变异产生作用的。我们已经看到，选择原理在人类手中是如此有效，那么它适用于自然界吗？我想我们将会发现，它可以最有效地发挥作用。我们必须牢牢记住，自然状态下的生物也会如家养生物一样，产生无数微小变异和个体差异，只是程度稍小一些而已。此外，不能忽略遗传倾向的力量。被驯化的家养动物，整个身体构造在某种程度上都是可塑的。不过，正如胡克和阿沙·格雷所说，对于家养动物来说，我们普遍看到的变异并不是由人类直接作用造成的；人类既不能创造变异，也不能阻止变异产生，人类只是保存和积累已发生的变异。当人类无意中把生物置于新的、变化着的生活环境中时，变异就产生了；但类似生存条件的变化，在自然界中也有可能发生。我们还应牢记，所有的生物之间，以及生物与其生活的自然环境之间，是无限复杂和紧密契合的。既然家养动物肯定发生了对人类有用的变异，那么，对每个生物有益的变异就不会偶尔在许多世代纷繁复杂的生存斗争中发生吗？如果确实发生了这种情况，我们是否可以怀疑，由于繁殖出来的个体比可以生存下来的个体多得多，具有任何优势的个体都比其他个体拥有更多生存和繁衍的机会？另一方面，我们可以确信，任何最低限度的有害变异终将灭绝。这种对有利变异的保存和对有害变异的消除，我称为“自然选择”或者“适者生存”。既无益也无害的变化不会受到自然选择的影响，它们或者成为不固定性状，正如我们在某些多型性物种中看到的那样，或者根据生物本身和外界生存环境的情况成为固定性状。

一些人对“自然选择”这个名词产生了误解或表示反对，有的人甚至想象自然选择可以引起变异。其实自然选择的作用，仅在于保存生活在某种条件下已经发生的、对生物有益的变异而已。任何人都不会反对农学家们所说的人工选择的巨大作用；但在这种情况下，必须以自然界产生出来的个体差异为基础，人类才可以想按照某种目的进行选择。另外一些人，之所以反对“自然选择”这一术语，是因为他们认为这个词语包

含变异的动物能够进行有意识地选择这一意义，但是既然植物是无意识的，那么这“自然选择”这个词就不适用于植物。就字面意思来说，“自然选择”肯定是不符合实际的用语；但是化学家们说各种元素具有“选择的亲和力”，又有谁反对过呢？严格来说，某种酸并没有特意选择某一种盐基去进行化合作用。有人反对我把自然选择解释成一种动力或神力，可是又有谁反对过行星运行是被万有引力控制的说法呢？人们都知道这些比喻的具体含义，为了简明起见，这种名词是有必要使用的。此外，很难避免“自然”一词的拟人化用法，但是我所谓的“自然”，是指许多自然法则的综合作用及其产物，而法则指的是我们所能确定的各类事物的因果关系。只要对这些内容稍加了解，就不会有人再坚持如此肤浅的反对意见了。

如果我们想要更好地了解自然选择的过程，就需要研究一下某个地区在自然条件轻微变化下发生的事情。例如，某一地区的气候发生变化时，该地区的生物比例也会发生变化，有些物种可能会灭绝。我们可以看到各地区的各种生物，紧密而复杂地联系在一起，由此可以得出结论：即使不考虑气候的变化，某些生物比例的变化也会严重影响其他生物。如果某一地区在边界上是开放的，那么肯定会有新的生物类型进入，这也将严重扰乱该地区原有生物之间的关系。不要忘记我们曾经证实，从外地引进某种树木或者哺乳动物而造成的影响有多大。但是对于岛屿或部分被障碍包围的地区而言，适应性好的新物种无法进入，则该地的自然生态中就会留出一些空位，当地就会产生一些变异物种去填补这些空位；而如果该地区允许外来物种进入，那么很快就会被外来物种占领。在这种情况下，任何能对生物个体有利的细微变异，都可以使生物个体更好地适应被改变的生活环境，而这些变异就有可能被保留下来，于是自然选择也就有更自由的空间去对生物进行改良。

如第一章所述，我们有理由相信，自然条件的变化有可能增加变异性。在上述情况下，生活环境发生变化时，有益变异的机会便会增加，这显然是有利于自然选择的。除非确实有有益变异的产生，否则自然选择将无济于事。正如我相信的那样，变异也包括个体差异。人类在一定方向上积累个体差异，并且在家养动植物中效果显著，自然选择也能够且更容易做到这一点，因为它发挥作用的时间比人工选择长得多。我也

认为不需要任何重大的自然变化（例如气候变化），或通过高度隔绝限制生物迁移，便可以让自然生态系统中出现一些空位，以便自然选择去改良某些生物的性状，然后让它们填补那些空位。因为每个地区的生物个体都在以均衡的力量进行斗争，个体的结构或习性上的微小变异通常会使其比其他个体更具有优势；如果在相同的生活环境下继续生存下去，此类生物的进一步变异通常会增加该类生物的优势。没有哪个地区能使所有当地生物都能如此完美地适应彼此以及它们居住的自然环境，以至于没有任何生物需要继续变异以适应当地生存环境。迄今为止，在许多地区，都可以看到从外地引进的生物迅速战胜本土生物，从而牢牢地占据这片土地。世界各地都存在外来生物只能打败某些本土生物的事实，因此，我们可以得出结论，本土生物也曾经产生过有利变异，以利于其抵御外来生物的入侵。

人类通过有计划和无意识的选择方式能够产生并确实产生了巨大的成果，那自然选择为什么就不能发挥这么大的作用呢？人类只能对生物的外表和可见性状进行选择，自然（这里我将“自然选择”或者“适者生存”拟人化了）却不关心外表，除非它们可能对生物个体有益。自然可以作用于每个内部器官、任何不同程度的体质上的差异以及整个生命机制。人类只为自己的利益做出选择，而自然进行选择却是为了保护生物本身的利益。从事实可以看出，每一个被自然选择的性状都充分受到自然的“锻炼”；而人类把不同气候下生存的生物蓄养在同一个地区，很少以特殊而恰当的方式增强每个选定的性状。人类用相同的食物喂养长喙鸽和短喙鸽；人类不以任何特殊方式训练长背或长腿的哺乳动物；人类将长毛羊和短毛羊饲养在相同的气候下；人类也不允许饲养的雄性动物为了获得雌性配偶而斗争。人类并没有严格地毁灭所有劣等动物，而是在不同的季节，尽其所能地保护所有家养动物。人类往往根据某些半畸形的性状、在某些方面引起其注意的性状或者是对其有益的性状进行选择。在自然状态下，任何生物在构造和体质上最细微的差异，都有可能改变生存斗争中的微妙平衡，这些差异也因此得以保存。人类的努力多么短暂！人类的一生又是何其短暂！因此，与整个地质时期自然积累的成果相比，人类选择的成果是多么贫乏。大自然的产物应该比人类的产物具有更“真实”的特征，它们可以更好地适应最复杂的生活环境，也能更明显地体现出选择优良性状的能力，对此我们也不必感到惊讶。

可以说，自然选择是每时每刻都在仔细检查遍及世界的每一个变异，甚至是最微小的变异；剔除不良的变异，保留并积累有益的变异；无论何时何地，只要还有机会，自然就会默默地工作，以改善每种生物及与其生存条件有关的事物。除非随着时间的流逝，否则我们无法发现这些缓慢的变化，而我们对过去的地质时代所知甚少，以至于我们只能发现现在的生物类型与以前的大不相同。

物种的形成需要大量的变异，只有在变种形成之后，经过很长一段时间，再次发生同样性质的有利变异或个体差异，并将这些变异再次保留下来，这样逐步发展下去才行。因为相同的个体差异经常会出现，所以上面的设想也是不无道理的。但是这个设想是否正确，还要看它是否符合并且能否解释自然界的普遍现象。另一方面，有些人认为变异量是有严格限度的，这也只是一种设想。

尽管自然选择只能通过保障每种生物的利益而产生作用，然而，即使是那些在我们看来不太重要的结构和性状，对生物来说也可能发挥着重要作用。当我们看到食叶昆虫呈绿色，而食用树皮的昆虫呈灰斑色时；冬天高山上的松鸡是白色，而红松鸡是石楠花色时，我们必须相信，这些色彩有助于保护这些鸟类和昆虫，让它们免于遭受危险。松鸡，如果在其生命的某个时期没有被消灭，数量将会一直增加；但众所周知的是，松鸡会遭受猛禽的捕猎而死亡。鹰依靠视力捕食猎物，鹰的视力如此之强，以至于在欧洲大陆部分地区，人们被警告不要饲养白鸽，因为它们最容易被鹰捕食。因此，我没有理由怀疑，自然选择可能最有效地为每种松鸡赋予适当的颜色，并且一旦获得，就让该颜色持续不变地保持下去。我们也不应该认为，偶尔杀害一只颜色特殊的动物不会产生什么后果，我们应该记住，在白色羊群中除掉一只略显黑色的羊会产生重大的影响。此前我们谈到，在弗吉尼亚有一种猪，它们食用“色根”，而猪的颜色则决定了它们吃了以后是死是活。在植物中，植物学家认为果实的果皮和果肉的颜色不是重要特征，然而，一位出色的园艺家唐宁说，在美国，表皮光滑无毛的果实遭受象鼻虫侵害的风险要比表皮有毛的果实高得多，紫色李子比黄色李子更容易遭受疾病侵袭，黄色果肉的桃子比其他颜色果肉的桃子更容易得某一种疾病。如果用人工选择的方法来培育这些变种，小的变异会慢慢累积成大的变异；但是在自然

状态下，这些树木必须与其他树木以及大量敌害进行斗争，此时，各种遭受病虫侵害时的差异就决定哪一个变种——果实有毛还是无毛，果肉黄色还是紫色——更具有优势。

在了解物种之间的差别时，就我们有限的知识来判断，这些细微的差别似乎并不重要，但是我们不能忘记，气候、食物等可能会对这些变异产生重要影响。但是，更需要牢记的是，根据许多未知的相关法则，当某一个部分发生了变异，并通过自然选择进行积累时，其他想象不到的变异将随之产生。

正如我们看到的，在任何特定时期出现的家养生物的变异，都倾向于在同一时期的后代中再次出现。例如，食用或农用植物的种子形状、大小及风味，蚕在幼虫期及蚕蛹期的变异，家禽的蛋以及颜色，牛羊接近成年时长出的角。因此，在自然状态下，通过在某些阶段积累有利的变异并且在相应阶段进行遗传，自然选择能在任何阶段对生物产生作用，并使其发生改变。如果植物的种子需要风来广泛地传播，那自然选择一定会让它发挥作用，这不比种植棉花的人通过选择的方法来增加和改善棉花的纤维更困难。自然选择可能会改变昆虫的幼虫，并使它们适应偶然出现的各种事故，但这些事故与成虫遭遇的完全不同。通过相关法则，幼虫期的变异无疑会影响成虫期的构造；相反地，成虫期的变异也可能会影响幼虫期的构造。但是，在任何情况下，自然选择将确保这些变异不会造成危害，否则，将会导致物种的灭绝。

自然选择会根据亲体让子体的构造发生变异，反过来也是如此。在群居动物中，为了群体的利益，自然选择会让个体的构造适应整个群体。自然选择无法做到的是，为了另一种物种的利益，在不给任何优势的情况下改变一种物种的结构；尽管可以在自然史著作中找到这种说法，但我找不到一个经得起调查的案例。即使在动物的一生中只使用一次的重要构造，也可以通过自然选择使其发生大的变异。例如，某些昆虫拥有的大颚，专门用于破茧；或者雏鸟的坚硬喙尖，用于破壳。有人断言，优良的短喙翻飞鸽，大部分死于蛋壳里，这个数量比能破壳孵出的多，所以养鸽者需要协助其孵化破壳。现在，如果自然选择为了这种鸽子的利益，而使成年鸽子的喙非常短，那么变异的过程必然非常缓慢，同时对幼鸽的选择也将非常严格，相对于具有最强壮、最坚硬的喙

的雏鸟，喙弱的雏鸟必然死在蛋壳内；或者自然也会选择更薄、更易碎的蛋壳，众所周知，蛋壳的厚度也会像其他结构一样发生变异。

虽然所有生物都会面临意外死亡，但是这很少甚至不会影响自然选择发挥作用。比如，每年都会有大量的种子和卵被吃掉，如果它们发生了某种变异，可让其免遭敌害吞食，那么就能通过自然选择改变这种情况。由这些没有被吞食卵和种子长成的个体，可能会比碰巧存活下来的个体，具有更强的适应性。同样，大多数已经长成的动植物，无论是否能适应它们的生存条件，也会由于偶然原因而死亡。即使它们的构造和体质已经发生了某种对物种有利的变异，这种偶然死亡的情况也无法避免。不论成长中的生物的死亡率多么大，只要它们在任何地区内依然有部分个体没有完全毁灭——即使卵或种子只有百分之一或千分之一的机会成长发育——那么幸存者中更能适应生活环境的个体，就会通过有利的变异，比那些适应能力差的个体繁殖出更多后代。假如所有个体都由于偶然原因被淘汰（事实上这种情况常有发生），那么即使是自然选择也将无能为力了。但不能根据这个论点，就抹杀自然选择在别的时期和别的方面产生的效果，因为我们没有理由去设想，诸多物种都曾在同一时期和同一地区发生了变异。

性选择

在家养状态下，有些特性往往只表现在一个性别中，并且只通过这个性别遗传；自然界也会发生同样的事情。如果是这样，自然选择将能够使雌雄两性根据不同生活习性而发生变异，或者更常见的是某一性别根据另一性别发生变异。我用几句话对所谓的“性选择”做简略的阐述：这不取决于为生存而斗争，而是取决于雄性之间为拥有雌性而进行的斗争；斗争的结果不是失败者死亡，而是失败者后代减少甚至没有后代。因此，性选择不如自然选择严格。通常，最强壮的雄性是最适应自然环境的个体，也会留下最多的后代。但在许多情况下，胜负并不取决于强壮的体格，而取决于雄性特有的武器。例如无角雄鹿和无距公鸡，留下后代的机会很小。通过始终允许胜利者进行繁殖来进行性选择，无疑会给公鸡带来不屈不挠的勇气、增加距的长度以及在斗争中拍打翅膀增加距的攻击力。这就好比残酷的斗鸡者精心挑选最好的雄鸡一样。我不知

道在自然界中，要到什么级别的动物分类，才没有性选择的存在。有人说，雄性鳄鱼为了得到雌性会战斗、吼叫和回旋，就像印第安人跳战斗舞蹈一样；雄性鲑鱼整天都在战斗；雄性锹形虫通常会遭受其他雄性巨大下颌骨的伤害。著名的观察家法布尔曾发现，有一种膜翅目昆虫，常常为了争夺雌性而发生争斗，而雌虫却在一旁漠不关心地观战，最后跟随胜利者离去。一夫多妻制动物之间的斗争可能是最激烈的，而这种雄性常拥有特殊的武器。食肉动物的武器已经很好了，通过性选择，又使它们具有了特殊的防御手段，就像雄狮的鬃毛、雄鲑鱼的钩形上颚等。对于胜利者来说，盾牌就像剑或长矛一样重要。

在鸟类中，性斗争通常更温和。所有研究过该主题的人都相信，歌唱是许多雄性鸟类使用的最激烈的性斗争方式，它们借此来吸引雌鸟。圭亚那的岩鹟、极乐鸟以及其他鸟类经常聚集在一起，雄鸟会在雌鸟面前展现其华丽的羽毛，并做出一些奇怪的动作，而雌鸟会作为观众在旁边观看，最后选择最有吸引力的雄鸟做配偶。那些密切观察过笼养鸟类的人清楚地知道，鸟类有各自的偏好。赫伦爵士曾经描述过，他养的斑纹孔雀是多么成功地吸引了所有的雌孔雀。在这里虽然不能做出详细的描述，但是，如果人类能够在短时间内根据其审美标准，让矮脚鸡具有美丽、优雅的姿态，那么我就有充分的理由相信，在几千年的发展中，雌鸟会根据自己的审美标准选择声音最悠扬、外貌最漂亮的雄性，由此而产生显著的性选择效果。在生命不同时期出现的变异，会在雌性后代或者雌雄两性后代相应的时期出现，性选择对这些变异起着重要作用；在一定程度上，用这种性选择的作用，可以解释雄鸟和雌鸟的羽毛为何不同于雏鸟的羽毛，在此就不详细讨论这个问题了。

因此，正如我相信的，当任何动物的雄性和雌性具有相同的日常生活习惯，但在结构、颜色或装饰上存在差异时，那么这些差异主要是由性选择引起的。这就是说，在连续数代遗传中，雄性个体会把攻击武器、防御手段或雄壮体格等略有优势的特点遗传给雄性后代。但是，我不希望将所有性别上的差异都归因于性选择。因为我们可以看到，家禽中有些雄性特有的特征并不能通过人工选择而增强。例如，野生雄火鸡胸前的丛毛对雄火鸡几乎没有用处，对雌火鸡来说也算不上装饰。事实上，如果这簇胸毛出现在家禽身上，是会被视为畸形的。

自然选择即适者生存的实例

为了弄清楚我相信的自然选择是如何起作用的，请允许我举出一两个例子。让我们以狼为例，它们以各种动物为食，在捕食时，它们时而使用技巧，时而使用力量，时而使用速度。让我们假设最迅速的猎物，以鹿为例，在狼捕食极其困难的时期，由于许多变化的发生，导致其数量有所增加或者减少。在这种情况下，当然只有跑得最快、体型最灵巧的狼才能获得最好的生存机会，从而获得选择和保存，当然它们还必须在各个时期都保存足够的力量，因为它们可能被迫需要去捕食其他的猎物。这和人类通过谨慎而有条不紊的选择来提高灵缇犬的敏捷性一样，也可能是无意识的选择，人们并没有期望能改变狗的品种。另外我想补充一点，根据皮尔斯先生所说，有两种狼的变种栖息在美国的卡茨基尔山脉上，一种形状略似长嘴猎狗，主要捕食鹿；另一种身体较大而腿较短，经常袭击牧人的羊群。

需要注意的是，上述事例中，我说的是那些动作敏捷、体型灵巧的狼能被保留下来，并不是说任何个体的显著变异都会被保留下来。在本书的前几版中，有时我会说单个显著变异常常被保留下来。因为以前我认为个体差异非常重要，并且详细论述了人类无意识选择的结果，这种选择是保存一切有价值的个体，同时除去不良个体。我曾注意到，对于偶然出现的任何构造差异，想在自然状态下被保留下来都是很难的。例如，一个既大且丑的畸形，即使最初被保存了下来，此后由于持续地与正常个体交配，特性会慢慢消失。但是，当我读了刊登在《北英评论》（*NorthBritish Review*，1867）上的一篇很有价值的文章后，我才认识到，不论是细微的还是显著的单独变异，都很难被长久保存下去。这位作者以一对动物为例进行了说明：虽然这对动物一生能够产200个仔，但平均只有2个幼仔可以存活下来并进行繁殖，因为会有种种原因造成幼仔的毁灭。对于大多数高等动物来说，这是一种极端情况，但对于许多低等动物来说，情况绝非如此。该作者指出，如果一个新生幼体由于某方面的变异，存活概率是其他个体的两倍，但因死亡率太高，想要存活下去仍困难重重。文章指出，假如这个新生幼体可以生存下去并成功繁殖，并且这种有利变异遗传给了一半的后代，其后代也只是多了一些生存和繁殖的机会，而且这种机会在以后还会慢慢减少。我非常认同这

些观点。假如有一种鸟由于喙的弯钩而可以非常容易地获得食物，假如这种鸟中有一只的喙生来就极为弯钩，并因此避免死亡而繁殖下去。即使这样，这种鸟要永久独自繁殖下去的机会依然是很渺茫的。不容置疑的是，以我们从家养动物中们观察到的情况来判断，如果把大量带点弯钩喙的个体一代代繁殖并保留下来，而把直喙的个体大量地剔除，就能达这个目的。

有一个不可忽视的事实是，相似的变异发生在相似的组织结构上时，这些显著的变异会屡次出现，这些变异不能仅被视为个体差异。关于这一事实，可以从家养生物中可以找到很多证据。在这样的情况下，即使变异的个体最初没有把新获得的性状遗传给后代，只要生存条件保持不变，它迟早会把按同样方式获得的更强变异遗传给后代。毫无疑问，按同样方式产生变异的倾向是十分强烈的，可以不经任何选择作用，使同一物种的所有个体产生相似的变异；或者仅有的1/3、1/5或1/10的个体受到这样的影响，关于这种情况，也可以列举若干实例。例如，根据格拉巴估算，法罗群岛大约有1/5的海鸠属于一个极显著的变种，而这个变种曾经被列为一个独立的物种，其学名被定为Uria Lacrymans。在这种情形下，如果变异是有利的，根据适者生存的法则，变异的新类型很快就会取代原有的类型。

杂交可以消除一切种类变异，这一点以后我还会谈到。但在这里我要说明的是，大多数动植物都固守本土，一般不做不必要的流动。候鸟也是一样，它们基本上都会返回原住地。因此，每一个新形成的变种，起初一般局限于原产地，对于自然状态下的变种来说，这似乎是一种普遍规律。因此，许多发生相似变异的个体通常很快就会聚集成小群体，共同生活，繁殖下去。假如这一新变种在生存斗争中取得胜利，就会从中心区域慢慢向外扩散，在继续扩大的区域边缘上，和那些未曾变化的个体进行斗争，并打败它们。

下面，我举出一个更复杂的案例来解释自然选择的作用。某些植物分泌甜汁液，显然是为了排出体液中的有害物质，例如一些豆科植物会从托叶基部的腺体中分泌出这种汁液，普通月桂树的叶子背面也会分泌这种汁液。这种汁液虽然量很少，但却被昆虫贪婪地寻觅，这对植物本身没有任何益处。现在让我们假设，甜汁或花蜜是从植物的花朵中分泌

出来的，在这种情况下，昆虫寻找花蜜时会沾上花粉，并且肯定会经常将花粉从一朵花转移到另一朵花的雌蕊上。因此，同一物种的两个不同个体就可以进行杂交了。我们有充分的理由相信，这种杂交会产生非常强大的幼苗，这种幼苗有更多的生存和繁殖机会。那些花蜜腺体越大的花朵，会分泌出越多的花蜜，也最能吸引昆虫前来，从而获得更多的杂交机会。从长远来看，它们就会占据优势并形成一个地方变种。同样，相对于拜访它们的特定昆虫的大小和习性而言，花的雄蕊和雌蕊所处位置适合的话，在一定程度上有利于昆虫传授花粉，这样花本身也会受益。如果来往于花间的昆虫不采花蜜只采花粉，由于花粉是专门用来授精的，那么这种对花粉的破坏显然是植物的一种损失。然而，如果吃花粉的昆虫偶然地将少许花粉从这朵花带到那朵花上，这样就产生了杂交。尽管九成的花粉被破坏了，但对植物来说仍然是很大的收获。因此，自然就会将那些更多花粉以及具有更大花粉囊的个体选择出来。

如果上述过程一直持续下去，植物将会吸引越来越多的昆虫，昆虫也会不自觉地传播花粉。有许多事实都可以证明，昆虫是可以很有效地做到这一点的。现在我仅举一例，来说明植物雌雄分株的步骤。一些冬青树只开雄花，每朵雄花有4个雄蕊，能够产生少量的花粉，同时还有1个不发育的雌蕊；另外有一些冬青树只开雌花，它们有1个发育完全的雌蕊以及4个花粉囊萎缩的雄蕊，雄蕊上并没有花粉粒。我在距离雄冬青树55米（60码）的地方找到了一棵雌冬青树，我从雌树的不同树枝上采集了20朵花，并把这些花的雌蕊放在显微镜下观察，毫无例外地，所有雌蕊都沾有花粉粒，有些雌蕊上的花粉还很多。那几天，风都是从雌树吹往雄树，因此雌花上的花粉不可能是靠风力传播的。那几天天气寒冷并且有暴风雨，因此对蜜蜂很不利，尽管如此，我检查过的每朵雌花都被采蜜的蜜蜂完成了受精。现在，回到我们想象中的情况：一旦植物对昆虫产生了如此高的吸引力，促使昆虫定期在花间传播花粉，另一个步骤可能就要开始了。没有博物学家对所谓的“生理分工”的优势表示怀疑，因此我们相信，对植物而言，在一朵或整株植物中单独产生雄蕊，而在另一朵或另一株植物中单独产生雌蕊是有利的。在经过培植并置于新的生存条件下的植物中，有时雄性器官或者雌性器官会退化。在自然界中，这种情况也会发生，只是程度比较轻微，因为花粉已经定期地从一朵花被带到另一朵花，按照“生理分工”的原理，性别的完全分离对植

物是有利的，因此具有这种趋势的个体将越来越多，并不断受益且被选择，直至雌雄两体最终完全分离。很显然，许多植物的雌雄分离正在进行，至于植物是如何通过二型性和其他手段来达到雌雄分离的目的，此文不再赘述。我只想补充说明一点，根据阿萨·格雷的研究，在北美，确实有几种冬青树完全处于中间状态，按照他的说法，是属于“异株杂性”的情况。

现在，让我们讨论一下吃花蜜的昆虫。假设我们可以通过不断选择而逐渐增加普通植物的花蜜，而且某些昆虫主要依靠它的花蜜作为食物。我可以提供许多事实，来说明蜜蜂是如何节省时间采蜜的。例如，有些蜂喜欢在花的根部挖洞并吮吸花蜜，这样就能避免从花的开口部位钻到花里去的麻烦。考虑到这些事实，我没有理由怀疑，那些大小和形态上的差异，如口径的长度、弯曲度等，对于我们来说可能是微不足道的，但是在一定条件下有利于蜂和其他昆虫。如此一来，有些个体能够更快地获得食物，从而有更好的生存和繁衍的机会，它的后代也可能会继承类似的性状。普通红三叶草和肉色三叶草的管形花冠，看起来长度并不相同。然而，蜜蜂可以轻易地采到肉色三叶草的花蜜，却不能采到红三叶草的；只有野蜂能采到红三叶草的花蜜。尽管红三叶草布满田野，蜜蜂也无法得到珍贵的花蜜。但是蜜蜂显然是非常喜欢这种花蜜的，因为我曾经观察到，在秋季，许多蜜蜂通过野蜂在基部咬破的小孔，去吸食花蜜。蜜蜂能否从这两种三叶草中采到蜜，取决于花冠的长度，但其差异却不大。因为有人告诉我，在红三叶草被收割后，长出的第二茬的花要小一点，到那时蜜蜂就能采蜜了。这种说法的准确性难以确定，也不知道发表的另外一篇文章是否可靠。那篇文章说，意大利种蜜蜂可以采食红三叶草的花蜜，而一般都认为，意大利种蜜蜂是普通蜜蜂的变种，并且可以与普通蜜蜂自由交配。因此，对于生长在长满红三叶草的地方的蜂来说，具有长一些或不同形状的吻是一个优势。另一方面，我通过实验发现，三叶草的繁殖力在很大程度上取决于蜜蜂的授精。当一个地区的野蜂变少了，那么花冠短小或分裂较深的植株就占有优势了，因为蜜蜂也可以采这种红三叶草的花蜜。因此，我们可以明白理解花朵和蜜蜂是如何通过持续保存结构上互相有利的微小差异而彼此适应的了。

我非常清楚，用以上想象的事例来解释自然选择的原理，正如莱尔爵士曾经“用地球近代的变迁来解说地质学”一样，必然会遭到他人的反对。但是我们现在很少听到有人说，用仍然活跃的一些地质作用来解释深谷和内陆崖壁的形成是毫无意义的了。自然选择的作用就是将无数微小的变异积累并保存起来，被保留下来的变异通常都是对个体有利的。由于近代地质学已经抛弃了诸如一次大洪水就能形成一个大山谷的观点，因此，自然选择原理会消除人们不断创造新生物的观点，或改变人们对生物结构能够突然发生重大变异的观点。

个体杂交

我先说个简短的题外话。对于具有不同性别的动植物，当然很明显，每次生育都必须交配才行。但是就雌雄同体的生物而言，这种情况并不明显。我有理由相信，所有雌雄同体的生物，无论是偶然还是习惯性，都有可能两两结合以繁衍其类。斯普兰格尔、奈特和凯洛依德都曾经提出过这样的观点。我们现在来谈谈这个观点的重要性，尽管我准备了足够的材料来讨论，但是在这里，我只能力求简洁。所有脊椎动物、昆虫以及其他一些大型动物，都必须交配才能生育。近代研究确定，所谓雌雄同体的生物的数量已大大减少；而即使是雌雄同体的生物，大多数也需要两两结合。也就是说，两个个体要进行交配才能繁殖，才是我们现在要讨论的问题。对于大多数雌雄同体的动物和植物来说，我们有什么理由认定它们是通过交配来繁殖的呢？在此我们无法讨论细节，只能简单描述一下。

首先，我收集了大量事实，都表明动植物不同变种之间，或同一变种但不同品系的个体之间的杂交，能够让后代更强壮、更具繁殖能力，这符合育种者们的信念；相反，近亲交配会减弱后代的体质和繁殖能力。仅凭这些事实就使我相信，自然界的普遍定律是：自体受精的生物不可能永远生存下去，需要与其他个体偶然或间隔一段时间进行杂交。

我认为，这是自然法则，由此可以理解以下几类事实，否则用任何其他观点都无法解释这些事实。凡是做杂交实验的人都知道，暴露在雨水下的花朵，受精是多么的困难；然而，有很多花的花粉囊和柱头是完全暴露在空气中的！如果偶尔的异体杂交是必不可少的，就可以解释这

种花蕊完全暴露的情况是为了别的花的花粉可以充分并且自由地进入。由于植物自身的雌雄蕊通常靠得很近，以至于自体受精几乎是不可避免的。也有一些例外，例如蝶形花科或者豆科植物，它们的结实器官是紧闭的；但是在几种（也许是全部）这样的花朵中，花朵的结构与蜜蜂吮吸花蜜的方式之间有着非常奇特的适应关系。对于蝶形花科的植物来说，蜜蜂的授粉非常必要，如果阻止蜂的来访，这些花的繁殖能力就会大大下降。蜜蜂从一朵花飞到另一朵时，肯定会将花粉从一朵花带到另一朵花，这对植物是有非常大的好处的。蜜蜂的行为就像刷子一样，先刷一下这朵花的雄蕊，再刷一下另一朵花的雌蕊，就完成了受精。但是，不能因此认为，蜜蜂会让不同作物之间产生大量的杂交品种。盖特纳曾经指出，在同一雌蕊上，同种植物的花粉比异种植物的花粉更具吸引力，而且可以抵消异种植物花粉的作用。

当一朵花的雄蕊突然弯向雌蕊，或慢慢地一个接一个地向雌蕊移动时，这种现象似乎仅仅是为了确保自花授粉，不过雄蕊的颤动有时候还需要昆虫的帮助。凯洛依德曾经说过，刺蘖（小蘖、伏牛花）就是如此。奇怪的是，这个属似乎都有自花传粉的特殊能力。众所周知，如果把近缘物种或者变种种植在一起，它们会自然杂交，很难产生纯种。在许多其他情况下，植物会有一些特殊的机制，来阻止雌蕊接收自花的雄蕊传来的花粉。根据斯普林格尔的著作以及我的观察，可以阐明这一点。例如，亮毛半边莲有一种巧妙的结构，能够在雌蕊准备受粉以前，从花粉囊中把花粉全部清除出去；由于昆虫从来不造访这种花，所以这种花从不结籽，至少在我的花园中是这样的。但是，通过将一朵花的花粉放在另一朵花的雌蕊上，我培育出了很多种子。而附近生长的另一种半边莲，因为常有蜂来造访，所以很容易结籽。在其他情况下，尽管没有特殊机制来阻止雌蕊自花授粉，但是正如我、斯普林格尔、希得伯朗及其他人指出的，这些花的花粉囊在柱头准备受精之前就破裂了，或者在花粉未成熟之前柱头已经成熟，因此这类植物被称作两蕊异熟，实际上是雌雄分化的，必须通过杂交才能繁殖，这也符合以上二型性和三型性植物的情形。这些事实是多么奇妙啊！同一朵花的花粉和柱头虽然靠得很近，就好像是为了自花授粉而形成的，可实际情况并非如此，真是太奇怪了！但是，如果我们用偶然的异体杂交的优越性和必要性来解释这些情况，那就十分简单了!

如果把甘蓝、萝卜、洋葱及若干植物的变种种植在临近的地方，那么据我发现，这样培育的幼苗，绝大多数都是杂种。例如，我们把几个甘蓝的变种栽培在一起，由它们的种子培育出233株幼苗，其中只有78株保留了原有性状，甚至还有一些不完全是纯种。然而，每朵甘蓝花的雌蕊不仅被它自己的6个雄蕊包围，还受同株植物上其他花朵的影响。而各个花内的花粉即使不依靠昆虫，也能轻易落在雌蕊柱头上，我曾经见过严防昆虫传粉的花朵顺利结籽。那么，为什么会有如此大量的杂种产生呢？我猜想是因为不同变种花朵上的花粉，比同种花朵上的花粉授精能力更强。这也进一步证明了，同种异体杂交具有优势这一观点是正确的。当异种杂交时，情况则正好相反，因为植物自身的花粉总是比外来花粉更占优势。 关于这个问题，我们将在以后的章节中进行介绍。

如果有一棵巨大的树开着无数的花朵，我们不应该认为，花粉很少能从一棵树传到另一棵树上，而最多只能从同一棵树上的一朵花传到另一朵花；并且也不应该认为，只有在特殊情况下，同一棵树上的花才能被视为不同的个体。我认为这是有道理的，但是自然已经对此进行了补救，它让同一棵树的花产生了雌雄分离。当两性分开时，尽管可以在同一棵树上产生雄花和雌花，但我们可以看到，花粉必须经常从一朵花传到另一朵花。　　这样一来，花粉偶尔从一棵树传到另一棵树的机会就更大。和其他植物比起来，所有属于“目”一级的树的雌雄分化现象通常更多，我在英国就看到过这种情况。应我的要求，胡克博士和阿萨·格雷博士分别将新西兰和美国的树木情况制成表格，结果出乎我的意料。另一方面，胡克博士最近告诉我，他发现该规律在澳大利亚不适用。我以树木为例进行讨论，只是为了引起人们对这个问题的关注。

简单讨论一下动物的情况吧。陆地上虽然有一些雌雄同体的动物，例如陆栖的软体动物和蚯蚓，但是这些动物都需要交配来授精。到目前为止，我还没有发现一例能自体受精的陆生动物。这个异乎寻常的事实正好和陆生植物形成强烈反差。如果参照偶然杂交的必要性原理，我们就完全可以理解这个事实了。因为精子不能像植物的花粉一样借助昆虫和风力传播，所以陆生动物只有依靠两个个体的交配才能完成偶然的杂交。在水生动物中，有许多雌雄同体的可以自体受精；但是，水流为它们偶然的杂交提供了机会。而且，我曾与权威学者赫胥黎教授讨论过，

世上是否存在某种动物，它是雌雄同体的，而且它的生殖器官是在体内完全封闭的，没有通向外界的途径，其受精过程也不会受到其他个体的影响；就如同讨论花的时候一样，我们没有找到这样的动物。很长时间以来，在上述这种情况下，我很难解释蔓足类的受精过程；但是，我非常有幸地从其他地方证实了，两个自体受精的个体偶尔确实是能进行杂交的。

有一个奇异的事情会让大多数博物学家感到震惊：对于动植物而言，属于同一科甚至同一属的物种，尽管在整体构造上几乎一致，但是有些是雌雄同体，有些是雌雄异体的。不过实际上，所有雌雄同体的动物都会偶尔与其他个体交配，就功能而言，雌雄同体和雌雄异体物种之间的差异就变得很小了。

基于这些因素以及我收集的许多事实（这里我无法一一提供），虽然动植物界中的偶然杂交不是绝对的，但也是一个很普遍的自然规律。

通过自然选择产生新类型的有利条件

这是一个极其复杂的问题。大量可遗传且多样化的可变性是有利的，其中也包括个体差异。在一定时期内，如果有大量的个体，产生了大量有利的变异，就可以弥补个体变异性较小的缺点，我认为，这是自然选择成功的极其重要的因素。虽然自然选择可以长时间发挥作用，但是这个时间的长度绝对不是无限的。可以说，由于所有生物都在努力斗争，以期在自然界中获得一个立足之地，如果一个物种没有跟随它的竞争者进行相应程度的变异和改良，它很快就会灭绝。假如有利变异无法遗传，自然选择也就不能发挥作用。虽然返祖倾向通常会抑制或阻止自然选择发挥作用，但是这种倾向既没能阻止人类通过人工选择培育出各种家养生物，也无法阻止自然选择发挥作用。

在有计划的人工选择的情况下，育种者会根据某种目的选择某些确定的对象，如果放任个体自由杂交，选择的工作就不会成功。但是，许多人并不打算改变品种，他们只是追求完美，试图让最优良的个体繁殖后代。虽然没有将已经选择出的个体进行分离，但是通过这种无意识的选择，也定能让它们缓慢地改良。在自然情况下也同样如此。在一个有

限的区域内，其自然环境中还会有某些地方没有被完全占据，虽然变异程度不同，但自然选择总是会保留所有朝着正确方向发生变异的个体。如果是在很大的区域内，不同的地区肯定会呈现出不同的生活环境，自然选择就会让同一个物种在不同区域形成不同的变种，而在这些区域的边缘地带，不同的变种之间就会彼此杂交。我会在第六章中阐明，生活在中间地区的中间变种，往往会被生活在边缘地区的变种取代。杂交对那些每次生育都必须交配、流动性大且繁殖速度不快的动物产生的影响最大。正如我看到的那样，一般具有这种性质的动物，例如鸟，它们的变种通常只局限于隔离的区域内。对于只偶尔杂交的雌雄同体生物，以及每次必须交配才能生育、流动性小且繁殖速度很快的动物来说，一个新变种可以在任何地方迅速改良和形成，并且在那里聚集成群，随后慢慢传播到其他地区。根据以上原理，育苗者总是喜欢从大量相同品种的植物中获取种子，因为这样可以减少与其他品种杂交的概率。

即使是对于必须交配才能生育且繁殖速度较慢的动物来说，我们也决不能认为杂交会消除自然选择的影响。我可以用大量事实来证明：在同一地区，同一个物种的不同变种可以长期保持不同性状，这是出于它们栖息在不同的场地，各自在不同的季节繁育，或者倾向于与同种个体交配等原因。

交配在自然界中扮演着非常重要的角色，可以保持相同物种或相同变种的个体纯正和一致。显然，它对于那些需要交配才能生育的物种来说，具有更重要的作用。前面我已经说过，我们有理由相信所有动植物都会偶尔杂交，即使需要间隔很长一段时间才会发生，我也确信，杂交产生的后代比自体受精产生的后代，更强壮，繁殖力也更强，以使它们有更好的机会生存和繁殖下去。因此，从长远来看，即使是很长时间才发生一次杂交，也会造成极大的影响。至于极低等的生物，它们不进行有性繁殖，个体之间也不会进行交配，所以永远也不会杂交。只要它们的生存条件不变，就只能通过遗传和自然选择消灭任何偏离原种的个体，以维持物种的性状保持不变。但是，如果它们的生存条件改变了，并且个体也发生了改变，只有通过自然选择保留相同的有利变异，才能赋予它们改良后代以一致的性状。

隔离也是自然选择过程中的重要因素。在有限的密闭或孤立的区域

中，有机和无机的生存条件通常会在很大程度上保持一致。因此，自然选择将倾向于在相同条件下以相同方式使同一物种的所有个体以同样的方式变异，这也会抑制生物与周边地区生物的杂交。关于这个问题，瓦格纳发表的一篇很有意义的论文中提到，隔离在阻止新变种进行杂交方面具有的重要性远超他的想象。但是，我无法赞同这位博物学者所说的隔离和迁徙是形成新种的必要因素这一观点。当任何物理条件（例如气候或陆地海拔等）发生变化后，隔离可能会更有效地阻止适应性更好的生物迁入这个地区。因此，在该地区的自然生态中就会空出一些位置，使原有生物产生变种后填充起来。最后，隔离就为新变种的缓慢形成提供了时间，这一点有时对新变种的形成是很重要的。但是，如果隔离区域很小，要么被障碍包围，要么自然环境很特殊，那么可以生存的个体数量就会很少。这样会减少出现有利变异的机会，也会极大地阻碍自然选择产生新种。

单是时间的流逝，对自然选择来说，并没有什么作用，它既不会促进也不会妨碍自然选择。我之所以对这一点做出说明，是因为曾经有人误会我，认为我曾经假定时间对物种的改变具有巨大的作用，好像由于内在规律，一切生物都会发生变异似的。时间的重要性只在于：一方面，它能使有利变异的发生、选择、积累和固定有较好的机会；另一方面，时间能加强自然环境对物种的直接作用。

如果我们去自然界检验这些言论的真实性，观察任何隔离的小区域，例如一个海洋岛屿，尽管栖息其中的物种数目很少，正如我们将在地理分布一章中看到的那样，在那里生长的物种都是当地独有的，在其他地方都没有。因此，乍看之下海洋岛屿似乎对新物种的产生非常有利。但是，我们可能因此而自欺欺人，为了确定是小的隔离区域，还是大的开放区域（例如大陆），更有利于生物新类型的产生，都应该在相等的时间内进行比较，而这正是我们无能为力的地方。

尽管我毫不怀疑隔离对于新物种的产生非常重要，但是总体而言，我倾向于认为宽广的区域对新物种的产生更为重要，尤其是对于长期存在并广泛传播的物种而言。在一个广阔而开放的地区，由于那里可以容纳同一物种的大量个体，因此有更多机会产生有利变异。但是由于大量栖息物种的生活环境极为复杂，如果众多物种中的某些物种发生了变异

或改良，则其他物种必须进行相应程度的改良，否则它们将会被消灭。每一种新类型，只要经过很大的改进，都将能够在开放和连续的区域中传播，从而与许多其他类型竞争。此外，由于地壳运动，目前连接着的广大区域，过去一定曾处于互相分裂的状态，因此隔离一定在某种程度上对新种产生过良好的作用。最后，我得出的结论是：尽管有些小的隔离区域在某些方面对新物种的产生非常有利，但是在大范围内，变异过程通常会更快。更重要的是，那些在大的区域形成的，已经在和许多对手竞争中取得了胜利的新类型将会传播得更广泛，产生更多新物种和变种，从而在生物界发展史中发挥重要作用。

也许我们可以根据这些观点理解一些事实，这些事实将在地理分布一章中再次提及。例如，和陆地面积较大的欧亚大陆比起来，陆地面积较小的澳洲的产物就稍为逊色。又如，大陆上的生物可以在各处岛屿驯化。在比较小的岛屿上，生存斗争将不再那么激烈，同样变异和灭绝也会变少。因此，也许可以说，根据奥斯瓦尔德·希尔的说法，马德拉群岛的植物区系类似于欧洲已灭绝的第三纪植物区系。与海洋或陆地相比，所有淡水盆地的面积都比较小，因此淡水生物之间的竞争将没有其他地方那么激烈；新类型的形成和旧类型的灭绝将更加缓慢。在淡水中，我们发现了7种硬鳞鱼，它们是一种占优势的目留下来的7个属。在淡水中，我们发现了当今世界上已知的一些最奇特的生物，例如鸭嘴兽和美洲肺鱼，它们就像活化石一样，与当今在自然等级上差距很远的一些目有一定联系。之所以它们能一直生存到现在，是因为它们居住在一个隔离的区域中，生存斗争没有那么激烈。

我将在极端复杂的问题允许的范围内，总结一下有利于或者不利于自然选择的情况。展望未来，对于陆地生物而言，可能经历了多次地面升降变迁的广大区域最有可能产生新的生物类型，长期存在并广泛传播。如果该地区是一片大陆，在此期间，生存在该地区的生物种类和个体就会非常多，那么生物面临的生存斗争也会非常激烈。当地面沉降而形成若干大的独立岛屿时，每个岛屿上仍将存在许多相同物种的个体，但是分布在边缘地区的新物种的杂交会受到限制。在新的物种进入被阻止后，自然环境的改变导致岛上生态系统中出现的空位，都需要由旧物种产生的变异类型填补，而且，漫长的时间会允许每个物种都能进行充

分的改良和完善。当再一次的大陆沉降将这些岛屿重新转变为一个大陆地区时，激烈的生存斗争会再次出现。最具优势或者改良最多的变种会得到广泛传播，而改良程度较低的类型将会消失。在重新形成的新大陆上，各类生物的比例数将会再次发生变化。自然选择将有充分的机会改良旧物种，从而创造新物种。

我完全承认，自然选择总是极其缓慢地起作用。自然条件想要发挥它的作用，则需要在现有的生活环境中留有一些空位，可以让现有生物变异之后更好地占有。而这些位置的出现，通常依赖于自然条件的缓慢变化，以及阻止更适应的外来生物的迁入。当旧物种发生变异后，它们与其他生物之间的相互关系就会受到干扰，此时新的位置就会出现，等待着新的类型占领。尽管同种个体间存在某种细微程度的差异，但需要经过漫长的时间，才能使它们的身体构造出现显著的差异；自由杂交常常会大大阻碍该过程。许多人会惊呼，这几个原因足以阻止自然选择的作用，但是我不相信。另一方面，我确实相信自然选择总是非常缓慢地起作用，而且通常仅在很长一段时间内，对同一地区的极少数个体起作用。我更加相信，这种非常缓慢的、间歇性的自然选择行为，与地质学告诉我们的生物的变化速度和方式非常一致。

尽管自然选择的过程可能很慢，但是如果力量有限的人工选择都能做很多事情，相信在很长一段时间内，在自然选择即适者生存法则的影响下，所有生物之间以及生物与其生活的自然环境之间相互适应的关系，一定会无限制地朝着更完美和更复杂的方向发展。

自然选择造成的灭绝

我们将在“地质学”一章中更全面地讨论该问题，但是在这里必须提到它与自然选择的紧密联系。自然选择仅以某种有利的方式通过保持变异而起作用，使这些变异可以持续下去。但是由于所有生物都以几何级数增加，而每个地区已经有足够的生物个体，随之而来的是，通过自然选择，占优势的个体数量会增加，同时处于劣势的个体会减少并变得稀有。地质学告诉我们，稀有性是灭绝的先兆。我们还可以看到，在季节变化或者敌害数量增多时，任何个体比较少的生物类型极有可能灭绝。但是进一步来说，随着新类型持续而缓慢地产生，除非我们相信物种类

型持续不断地并且几乎无限地增加，否则很多旧的类型必然会灭绝。地质学清楚地表明，物种类型的数量并没有无限增加。接下来我会尝试说明，全世界的物种数目没有无限增加的原因何在。

另外，在任何时期，个体数量最多的物种将有最好的机会产生有利的变异，对此，我们有证据可以证明。第二章的事实表明，普通且分布广泛的优势物种产生了最多的变种。因此，个体稀少的物种变异和改良的速度都不会很快，它们在生存斗争中很容易被普通物种的改良或变异过的后代击败。

基于以上几点，我认为不可避免的是，随着时间的推移，新物种通过自然选择而形成，而有些物种将变得越来越稀有，甚至最终灭绝。与正在经历变异和改良的类型有着激烈竞争的类型自然会遭受最大的损失。我们在关于生存斗争的章节中看到，那些关系密切的类型，例如同种的各个变种，同属或近属的各个物种，由于结构、体质及习性相似，它们之间的竞争通常最激烈。因此，每个新变种或物种在其形成过程中通常会给最近缘种类造成最大的威胁，并倾向于最终消灭它们。同样我们也看到了，通过人工选择改良的类型，家养动植物也会出现相同的灭绝过程。我们还可以给出许多奇特的例子，牛、绵羊和其他动物的新品种以及花朵的变种是如何很快取代旧的、低劣的种类的。在约克郡，通过历史的记载，我们可以知道，古老的黑牛被长角牛取代，长角牛“又被短角牛如同残酷的瘟疫一般消除干净了”（引用一位农业作者的话）。

性状趋异

这个术语包含了重要原理，并且解释了一些重要现象。首先，变种，甚至是已经具有物种特征的显著变种，彼此之间的差异肯定远不及那些单纯而明确的物种之间的差异，在很多情况下很难对它们进行分类。不过，根据我的观点，变种是处于形成过程中的物种，或者正如我所说的，它们是初期物种。那么，变种之间的较小差异是如何扩大为物种之间的较大差异的呢？自然界中的无数物种都存在显著的差异，而变种作为未来可以发展为物种的原型和亲体，则表现出细微且不确定的差异。我们可以说，由于偶然变故，可能会导致变种在某些方面与亲体有所不同，该变种的后代在特征上就会在性状上与亲体产生更大的差异。

但是，仅此一项，并不能在同一属的不同物种之间造成如此常见的巨大差异。

按照惯例，让我们从家养生物中寻求解释，从中我们可以找到一些类似的情况。我们必须承认，像短角牛与赫里福德牛、赛马和拉车马以及不同品种的鸽子等彼此差异极大的品种，绝不可能仅仅是在连续几代中通过偶然积累相似变异而产生的。有的养鸽者喜欢喙较短的鸽子，有的喜欢喙较长的。有个公认的事实是，养鸽者喜欢极端的类型，不喜欢中间类型。他们会继续选择和繁育喙更短或者更长的鸽子，就像培育翻飞鸽那样。另外，我们可以假设，在早期，某个地区或某些人喜欢奔跑速度快的马，而另外一些地区或者另外一些人更喜欢笨重但强壮的马。初期差异可能很小，随着时间的流逝，一些育种者继续选择较快的马，另一些继续选择强壮的马，两者之间的差距将变得更大，会变成两个亚种。最终，经过几个世纪的发展，亚种将转变为两个成熟且独特的品种。随着差异的逐渐扩大，具有中等特征的劣等马，既不是很快也不是很强壮，就不会被选来配种，最后就会消亡。然后，我们通过人工选择的产品可以看到所谓性状分歧趋异的作用，初期的差异几乎难以察觉，然后稳步增加，最后让品种出现不同于亲体的差异。

但是，可能有人会问，这个原理可以运用在自然界吗？我相信，它确实能最有效地应用。简单来说，任何一个物种的后代，在结构、体质和习性上越多样化，就越能够更好地占据自然界中的不同地方，从而使数量得以增加。

对于习性简单的动物，我们可以清楚地看到这一点。以食肉哺乳动物为例，在任何地区，可以容纳的哺乳动物的数量早已达到了平均饱和量。如果一个地区的自然状况没有发生任何变化，那么只有发生了变异的后代才能成功占据当前被其他动物占领的地方。例如，它们中的一些能够以新的猎物为食，无论是死的还是活的；有些可以生存在不同的场所，例如树上或者水里；有些减少了食肉的习性等。食肉动物的后代在习性和结构上越多样化，能够适宜它们居住的地方就越多。适用于一种动物的原则将始终适用于同一时期的所有动物，也就是说，除非它们发生变异，否则自然选择将无能为力。植物也是如此。实验证明，如果一块地上只种一种草，在另外一块相似的土地上种几种不同的草，那么我

们可以从后一块土地上获得更多数量和更大重量的干草。如果在两块相似的土地上，分别种植一种小麦和多种小麦，也会得到相同的结果。因此，如果有任何一种草继续发生变异，即使变异非常微小，这些变种也能像不同的物种或者属一样，通过相同的方式被选择出来。于是，这种草中的更多个体，包括其变异的后代，将能够成功生活在同一片土地上。我们知道，各个不同物种和不同变种的草类，每年播种的种子几乎不计其数；可以说，它正在竭尽全力增加其数量。因此，我毫不怀疑，在数千代相传的过程中，任何一种草的最显著变种，总有最大的机会增加其数量，从而取代变异微小的变种。当变种之间的区别变得非常明显时，它们就被称为物种了。

生物构造的多样性，可以使其最大限度地获得生活空间，在许多自然情况下都可以发现该原理的正确性。在一个很小的区域，特别是开放的、生物可以自由迁入的地区，个体与个体之间的生存竞争往往非常激烈，当地的生物也更具多样性。例如，一块多年来没有发生变化的长1.2米（4英尺）、宽0.9米（3英尺）的草皮，生长了20种植物，分属8个目的18个属，由此可以表明，这些植物之间的差异很大。在情况类似的小岛上和淡水小池塘里面，植物和昆虫的情况也是如此。农民发现可以通过轮流种植不同目的植物来获得更多粮食，自然则遵循所谓的同时轮种原则。假设有一小块土地，它只是普通性质的土地，大多数动植物都可以在那里生活，或者说是竭尽全力地生存。按照一般规律，我们可以看到，在生存斗争最激烈的地方，由于构造的分歧和习性、体质趋异，那些异属和异目的生物之间的斗争也是最激烈的。

通过人为作用可以让植物实现异地归化，也说明了同样的原理。在任何土地上都能成功归化的植物，通常与当地植物有着近缘关系，因为一般都认为，当地植物都是专为适应这块土地而生长的。此外也有人认为，能够归化的植物只属于少数的几类，而且特别能适应迁入地区的条件，但是情况却并非如此。德康多尔在他伟大而令人钦佩的作品中指出，通过归化而增加的植物中属的数目，要多于本地的属与物种的数目。举一个例子：在阿萨·格雷的《美国北部植物志》中，列举了260种归化植物，它们属于162属。由此可见，这些归化植物具有高度趋异性。而且，归化植物在很大程度上不同于本地植物，因为在这162个属

中，不少于100个属不是本地原生的，因此，现在生存于美国的属就有了很大比例的增加。

通过考察在任何地区都能战胜本地植物并且成功归化的动植物的性质，我们可以粗略了解到，本地植物需要如何变异才能获得比外来植物更大的优势。由此可以推断出，构造的分歧化能达到新属差异，肯定对它们的生存是有利的。

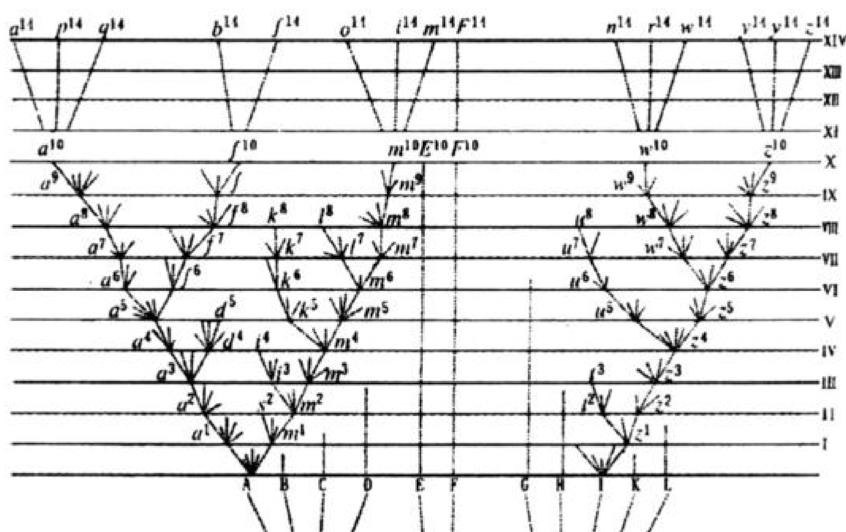
实际上，同一地区性状趋异带来的优势，就好像体内不同器官的分工一样，爱德华兹非常清楚地阐明了这个问题。任何生理学家都不会怀疑，适合消化素食的胃从素食中获得的营养最多，适合消化肉食的胃从肉食中获取的营养最多。因此，在任何地区的自然生态中，动物和植物为适应不同的生活习惯而更加广泛和完美地发展，有更多的生物个体能够在那里生存下去。一个在身体构造上很少分异的动物群体，很难与分异完善的动物竞争。例如，可能会有人怀疑，澳洲有袋动物可以分为彼此间差异很小的几类，分别是食肉、反刍和啮齿动物。正如沃特豪斯所说的那样，它们无法与那些发达良好的动物竞争。在澳大利亚哺乳动物中，我们可以看到，性状分异还处于早期和不完善的状态。

通过性状趋异和绝灭，自然选择对一个共同祖先的后代发挥作用

经过以上讨论，我们可以假设，任何一个物种的改良后代都会在结构上更加多样化，然后取得更大的成功，从而能够侵占其他生物占据的地方。现在，让我们看看从性状趋异中衍生获利的原理，以及它是如何与自然选择原理、灭绝原理结合并发挥作用的。

下图将帮助我们理解这个相当复杂的问题。图中的A到L代表某地大属的各个物种，这些物种彼此的相似度不一样，就像自然界中的一般情况一样，并且在图中以距离不等的字母表示。我们在第二章中已经看到，平均而言，大属的物种比小属的物种更多；并且大属的不同物种具有更多的变种。我们还看到，最常见和分布最广泛的物种比范围有限的稀有物种变异更多。假设A代表一个大属中常见的、分布广泛的正在变异的物种，从A发出的长度不等的、分散的虚线代表其变异的后代。假

设这类变异虽然细微却拥有很高的分异性，它们不是全部同时出现，而是经常间隔一段时间出现，且持续的时间长短也不同，那么，只有那些有利变异才会被自然选择保存。从这里我们就能看出性状分异原理有利的重要性，因为这通常会导致通过自然选择来保留和积累性状分歧最大的变异（用外部虚线表示）。当图中的虚线遇到横线并用小写字母和数字标记时，就应当认为，已经累积了足够数量的变异，可以让该类型称为一个性状显著的、值得被文献记载的变种了。



图中两条横线之间的间隔代表一千代甚至更多世代。经过一千代，物种A应该已经产生了两个显著变种，即a^1和m^1。通常，这两个变种将继续处于与亲代相同的生存条件下，而变异的趋势本身就是遗传的，因此它们很可能按亲代变异的方式继续产生变异。而且，这两个变种只是细微变异，因此倾向于遗传它们亲代和亲代所在属的优点，即那些让它们亲代能比本地其他生物更繁盛的优点；它们还遗传了亲代所在大属的一些优点，这些优点曾使其属成为大属，而且我们知道这些条件都有利于新变种的产生。

如果这两个变种继续发生变异，接下来的最显著的性状变异都会被保留下来。这段时期之后，假定已经由图中变种a^1产生变种a^2，由于趋异的原理，a^2与A的差异一定大于a^1与A的差异。假定变种m^1产生了两个变种，即m^2和s^2，它们彼此不同，并且与它们的共同父辈A更为不

同。我们可以通过类似步骤在任何时间范围内继续该过程；有些变种每一千代只产生一个变种，但随着自然条件的变化，有的变种会产生两个或三个变种，有的则不会产生。因此，从同样的祖先A产生的变种，改良过的后代通常会继续增加数量，并在性状上继续变异。在该图中，这个过程仅到第一万代为止，从一万代到一万四千代，则用虚线简略表示。

但在此必须指出，我不认为该过程会像图中所示那样有规律地或者连续进行，尽管图表本身就反映了一些不规则。我绝不认为最分异的变种一定会被保留下来并成倍增长，虽然中间类型也可能会长期存在，可能产生一个或多个变异的后代。因为自然选择始终会根据未被占据或未被完全占据的地方的性质发挥作用，而且这也取决于某种无限复杂的关系。但一般来说，任何一个物种的后代，如果在性状上越分异，就可以占据越多的位置，其变异后代就能繁殖得越多。在我们的图表中，连续的系统以固定间隔用小写字母中断，这些字母表示连续变异已经变得足够充分，可以被标记为变种了。但是这些中断是虚构的，是可以出现在任何位置上的，只要间隔时间足够长且可以使变异大量地积累起来，就可以了。

大属内常见的、分布广泛的物种产生的变异后代，大都继承了亲代的优势，这种优势让它们的亲代在生存竞争中存活下来，一般也会继续增加这些后代的个体数量和性状变异的程度。这在图中由A开始的几个分支表示。图中从A延伸出来的几条没有达到顶部的分支虚线，表示早期变异较小的后代，它们已经被后来产生的、更为优良的后代取代且灭绝了。在某些情况下，我毫不怀疑，变异的过程被限制在一条支线上，尽管分歧变异的量在不停增加，但是变异后代的个体数量却没有增加。如果删除了从a^1到a^{10}这些支线之外，从A开始的所有虚线，就可以清楚地反映出这种情况了。同样的，例如，英国赛马和英国指示犬，性状已经慢慢地发生改变了，但是并没有产生新的分支或品种。

假设经过一万代之后，物种A产生了三种类型，即a^{10}、f^{10}和m^{10}，由于历代的性状分异，它们彼此之间以及它们和共同的祖先A之间，已经有了很大的差异，但是这些差异可能不相等。如果我们假设图表中每条横线之间的变异量很微小，则这三种形式可能仍然只是显著变种；但

是我们只需要假设变异的步骤更多或变异的量更大，这三个变种就可能成为可疑物种，接着发展成明确的物种。因此，该图说明了将区分变种的小差异增大为区分物种的大差异的步骤。如果相同的过程按图中所示（以图中简略虚线显示）进行，更多的世代以后，我们可以得到源自A的由a^{14}和m^{14}之间的字母标记的8个物种。我相信，物种就是这样增加的，属也是这样形成的。

在一个大属中，可能不止有一个物种会发生变异。假设在图表中的第二个物种I经过类似的步骤，在一万代之后产生了2个显著变种，或是根据图中横线代表的变异量，产生了2个物种（w^{10}和z^{10}）。一万四千代后，应该产生了6个新物种，以字母n^{14}至z^{14}标记。在每个属中，那些差异非常大的物种，通常会产生最多数量的变异后代，因为它们有最好的机会占据自然界中新的位置。因此，在图中，我选择了极端物种A以及几乎极端的物种I，因为它们变异最多，并产生了新的变种和物种。原属内的其他9个物种（以大写字母标记），可以长期继续传播未变异的后代；此情况在图中用长短不等的虚线表示。

但是在图中所示的变异过程中，还有另一条原理，即灭绝原理也发挥着重要作用。在每个充满生物的地区中，自然选择的作用主要体现在，被选择保留的类型在生存斗争中比其他类型更具优势。在任何阶段，任何一个物种的变异后代，都会不断取代和消灭其前代和原始祖先。我们应该记住，在习性、体质和构造上最密切相关的那些类型之间，生存竞争通常最激烈。因此，在较早状态和较晚状态之间的所有中间类型，也就是处于同种类型中改良较少和改良较多之间的类型，通常都会趋于灭绝。因此，有可能生态系统中有些整个的分支都会被后来改良了的分支取代直至灭绝。但是，如果某个物种的变异后代进入另一个地区，迅速适应了新的环境，后代与祖先就能和平相处，各自生存下去。

假设我们的图表代表了相当大的变异量，物种A和所有较早的变种都将灭绝，被8个新物种（a^{14}至m^{14}）取代；物种I将被6个新物种（n^{14}至z^{14}）取代。

进一步说，在自然界，通常同一属的原始物种，彼此相似程度不

等。物种A与B、C和D的关系比与其他物种的关系更近；物种I与G、H、K、L的关系比较近。假定A和I这两个物种是非常普通且广泛分布的物种，那么它们最初比其他大多数该物种更具有优势。它们的后代，即在第一万四千代后产生的14个新物种，可能会继承一些来自共同祖先的相同优点。在系统的每个阶段，它们都以各种方式进行了变异和改良，以便它们在本地的生活环境中占据更多的位置。在我看来，它们极有可能会取代它们的祖先A和I，并导致A和I因此灭绝，而且还可能消灭了与它们祖代近缘的那些原始种。因此，很少有原始物种能够传到第一万四千代。我们可以假设，那两个与其他九个种最疏远的原始物种，即E和F，只有F可以将后代延续到最后阶段。

在图表中，从最初的11个物种衍生了15个新物种。由于自然选择的趋异倾向，新物种a^{14}和z^{14}之间的极端性差异将远大于原始物种中最不同的物种之间的差异。新物种之间的亲缘远近程度也很不相同。物种A的8个后代中，a^{14}、q^{14}和p^{14}是由较近的a^{10}分化出来的，彼此之间的关系比较近。b^{14}和f^{14}是由早期的a^{5}分化出来的，因此在某种程度上与前面三个物种有差异。而最后分离出来的o^{14}、e^{14}和m^{14}亲缘关系很近，由于它们是在变异一开始就分化出来的，因此与上面5个物种差异特别大，它们有可能构成一个亚属，甚至是一个独特的属。

物种I的6个后代可以组成两个亚属，甚至是两个属。但是由于原始物种I与A有很大不同，I几乎处于原始属的另一个极端，由于遗传的作用，I的6个后代与A的8个后代会有很大差异；而且，这两个群体应该继续朝着不同的方向发展。还需要考虑一个非常重要的因素，连接原始物种A和I的中间物种，除了F外，全部都灭绝了，并且没有产生后代。因此，必须将来自I的6个新物种和来自A的8个新物种分类为非常不同的属，甚至不同的亚科。

因此，我相信，两个或者更多的属，可以通过变异繁衍，从同一个属的两个或者更多物种中产生，并且这两个或者两个以上的亲种是从较早的一个属的某一物种中产生的。图表中大写字母下方的虚线就表示了这种情况，这些虚线分为几个支群，再向下聚合到一点。这里的一个点代表一个物种，它很可能是几个新亚属或者几个新属的祖先。

另外一个新物种F^{14}的特性也值得我们讨论。假定这个物种保持着F的形态，没有什么大的改变，性状分异也不大，那么在这种情况下，它与其他14个新物种之间就有了间接的亲缘关系。假定这个物种F^{14}起源于两个物种A和I之间的某个未知且已经灭绝的早期类型，它们的性状在某种程度上也介于A和I的后代之间。由于这两个物种的后代，已经在性状上与亲种分异，新物种F^{14}将不会直接介于这些新物种之间，而是介于两个大组之间的中间类型，每个博物学家都能找到这样的案例。

在该图中，每条横线都代表一千代，也可以代表一百万代或更多代；它也可以表示，含有已灭绝生物遗体地壳的连续地层中的一部分。在地质学这一章时，我们将再次讨论该问题。我们随后将看到，该图阐明了灭绝物种之间的亲缘关系。尽管它们与现存物种属于同目、同科或同属，但在某种程度上，它们的性状通常处于现有物种的中间状态。我们可以理解这一事实，因为灭绝物种生活在非常古老的时代，而那时候后代的性状分异比较小。

我认为上述变异的演化过程不应该仅限于解释属的形成。如果在图中，我们假设虚线代表的各个连续变异组变异量非常大，a^{14}到p^{14}、b^{14}到f^{14}以及o^{14}到m^{14}代表的群类型将形成三个极不相同的属。有两个非常独特的属是从物种I传下来的，与A的后代差别很大。这两个属可以组成两个不同的目或者不同的科，这取决于图表中表示的变异量的大小。并且，这两个新科或新目起源于同属的两个物种；而这两个物种应该起源于一个更古老且未知的类型。

我们已经看到，在各个地区中，较大属的物种通常容易出现变种或初期物种。确实，这可能是预料之中的。因为只有当一个类型在生存斗争中比其他类型占有优势时，自然选择才能起作用，并且通常作用于已经具备了明显优势的物种；而且任何生物群体的庞大都表明它们已经从同一个祖先那里继承了一些共同的优势。因此，为形成新的改良后代而进行的斗争主要集中在较大的生物群之间，而这些生物群都在努力增加个体数量。一个大群将慢慢征服另一个大群，减少其个体数量，从而减少其进一步变异和改良的机会。在同一个大型的生物群中，后出现的、改良程度更高的亚群在自然体系中继续分异，以占据更多的新位置，将不断趋向于取代和摧毁较早出现的和改良程度较低的亚群。最终，那些

小的、弱的亚群和群体就会灭绝。展望未来，我们可以预测，现在巨大而占据优势的生物群，由于最少遭到破坏，很少遭到灭绝之灾，它们的数量将长期持续增长。但是，哪个生物群最终会占上风，没有人能预知；众所周知，许多以前发达的生物群现在已经灭绝了。对于更远的未来，我们还可以预测，由于较大生物群的持续稳定增长，许多较小生物群将彻底灭绝，不会留下任何后代。在任何时期，能把后代一直延续下去的物种只是极少数而已。这里需要补充说明的是，基于这种观点，很少有较古老的物种的后代能传到今天；同样出于这个原因，我们可以理解，同一物种的所有后代组成的纲，为什么在动植物界中是如此之少。尽管现在极少数最古老的物种可能具有活着的和经过改良的后代，然而，在最遥远的地质时代，像现在一样，地球上也可能有许多属、科、目、纲的生物存在。

生物体制进化可达到的程度

自然选择的作用在于，在生命的各个时期，保存和积累各种在有机和无机条件下产生的对生物有利的变异。最后的结果将是，各种生物与生存条件之间的关系日益改善，而这种改善会促使世界上更多的生物体制逐渐进步。这样就出现了一个问题： 什么是体制的进步？对此，博物学家还没有给出一个让大家都满意的答案。对于脊椎动物来说，智慧的程度和躯体构造上向人类靠近就标志着进步。也许有人认为，胚胎发育为成体的过程中，身体各个部分和各个器官的变化量可以作为比较的标准。但是，有些成体的构造并不比幼体高级，比如一些寄生的甲壳动物，成年后身体的某些部分反而变得不完善了。冯贝尔先生提出的标准，也许是最好的且广泛采用的标准。他把同一生物（这里是指成体）各器官的分异量和功能的专门化程度作为标准，也就是爱德华兹所说的按生理分工的彻底性程度作为标准。可是，只要观察一下鱼类，就能发现这个问题并不简单。因为有些博物学家把最接近两栖类的类型（如鲨鱼）定义为最高等的鱼，而另一些人却把硬骨鱼定义为最高等的鱼，因为它们拥有典型的鱼形，而且最不像其他脊椎动物。在植物界里，这个问题也很棘手，因为很难用智力作为标准。有些人把花的器官（花萼、花瓣、雄蕊和雌蕊等）发育完全的植物定义为最高等；同时，另一些人则认为花的器官变异增大而数目减少的植物是最高等的，我认为后者更

加合理。

假如把成年生物器官的分化和专门化（包括促进智力发达的脑进化）当作高级体制的标准，自然选择肯定会向着这个标准进化： 生理学家都认为，器官的专门化可以促进器官更好地发挥功能，这对每种生物都有重要作用，因此向专门化方向积累变异是自然选择作用的体现。但是，我们还应注意，一切生物都在努力以高速率增加个体数量，并占据自然体系中未被占据或者尚未被完全占据的位置；自然选择可能使某种生物逐渐适应某种环境。对于这个环境来说，某些多余的、无用的器官会出现退化现象。总体来说，生物体制是否是从远古地质时代向现代进化呢？这个问题我将在《古生物的演替》一章中进行讨论，那样可能会更方便。

对以上问题持否定态度的人会说，如果说生物发展是倾向于不断提高等级，那么自然界为什么还存在那么多低等类型的生物呢？为什么在一个大的纲内，一些生物类型要比另外一些发达得多？为什么在任何一个地方，高度发达的类型都没能把低等类型消灭掉？拉马克先生相信，所有生物都有使身体构造必然趋于完善的天赋，而这使他在回答上述问题时遇到了很多困难，于是他就只好假定新的简单类型在不断自发地产生出来。但是到目前为止，该假定并没有得到科学证实，将来能否证明，同样是未知的。而根据我们的理论，低等生物的持续存在并不难理解，因为自然选择即适者生存的原理并没有持续发展之意，它仅仅是保存和积累那些在复杂生活关系中出现的有利变异。试想一下，高级的构造对浸液小虫、肠寄生虫及某种蚯蚓到底有什么好处？如果改变没有好处，自然选择就不会或者很少会将这些改变保留下来，它们会将现在的低等状态一直保持下去。通过地质学我们可以知道，一些最低等的类型，如浸液虫和肉足虫，在很长一段时间内一直保持着现在的状态。但是，如果认为现存的低等类型自有生命以来毫无进步，那也太武断了。解剖过低等生物的博物学者，都会对它们奇特而美妙的构造留下深刻的印象。

我们可以用类似观点来解释，为什么同一大类群中具有不同等级的生物。例如，哺乳动物与鱼类并存在脊椎动物中；人与鸭嘴兽并存在哺乳动物中；鲨鱼与文昌鱼并存在鱼类中（现在的分类学将文昌鱼分属于

头索动物），后者的构造非常简单，接近于一些无脊椎动物。但哺乳动物与鱼类之间竞争很小，即使整个哺乳纲或纲内某些成员进化到最高级，也不会取代鱼类的地位。生理学者认为，必须有热血流入，才能使大脑活跃，而这就需要呼吸空气，所以温血哺乳动物如果栖息于水中，就必须经常到水面呼吸，这对它们来说并不方便。至于鱼类，鲨鱼科的鱼不会取代文昌鱼。米勒告诉我，在巴西南部荒芜的沙岸边，文昌鱼唯一的伙伴和竞争对手是一种奇特的环节动物。有袋类、贫齿类和啮齿类是哺乳类中最低等的三个目，它们在南美洲能与许多猴子共存，彼此之间很少有冲突。总之，世界上生物体制也许曾经有过进化，而且还在继续进化，但在结构等级上会呈现各种不同程度的完善，因为某些纲或纲内某些成员的高度进步，没有使那些和它们无竞争关系的生物类群灭绝的必要。我们还会发现，在某些情况下，有些低等生物栖息于有限的或特殊的区域，因那里没有激烈的生存斗争，个体数量也很稀少，阻碍了有利变异的发生，因而使它们一直延续至今。

总而言之，低等生物能在地球各个地方生存，是由各种因素造成的。有些情况下，有利变异或个体差异从未发生过，导致自然选择无法发挥作用。如此一来，在任何情况下，它们都没有足够的时间去实现最大限度的发展。在少数情况下，甚至出现了退化。但是主要原因是，在极简单的生存条件下，高级结构是无用的甚至是有害的，因为构造越精巧，就越不容易被调节，从而容易受损伤。

我们相信，在生命的初期，一切生物的构造都非常简单。那么，各个器官的进化或分异的第一步是如何出现的呢？对此，斯宾塞先生的观点是这样的：一旦简单的单细胞生物成长或分裂为复杂的多细胞生物时，或者附着在任何一个支撑物的表面时，根据斯宾塞的法则，就会出现这样的情况——任何等级的相似单元都会依照它们与自然力的关系，按比例发生变化。但是这个说法并没有事实依据，几乎没有什么用处。如果没有众多类型的产生，就不会有生存斗争，也就不会有自然选择，这也是一种错误的观点。因为生活在隔离地区的单一物种也可能会发生有利变异，从而让整个群体发生变化，甚至会形成两个不同的类型。我在前言末尾说过，如果我们承认，对现在世界上生物间的相互关系所知甚少，对过去的情况更是十分无知，那么，我们也就不会奇怪，为什么

在物种起源方面仍有许多无法解释的问题。

性状趋同

尽管沃森先生也相信性状趋异的作用，但他认为我对性状趋异的重要性估计过高，同时他认为性状趋同也会起一些作用。假如两个近缘属的不同物种各自产生了许多分异的新类型，假设它们彼此类似，以至于可以划分到同一个属。这样，异属的后代就是同一属的了。但是，在大多数情况下，仅仅因为构造上的相似，就把不同类型的后代视为性状趋同，也太过轻率了。分子的结合力决定了结晶体的形状，不同物质有时会呈现相同的形状也就没什么可奇怪的了。对于生物来说，每一类型都依存于无限复杂的关系，既包括已经发生了的，原因复杂又难以说明的变异，还依存于选择并保留下来的变异的性质，这与周围的自然地理环境有关系，主要是和与它进行竞争的周围生物有关系；最终，还与无数代祖先的遗传有关，因为遗传本身也是一种变动的因素，而所有的祖先也都是通过同样复杂的关系来确定其类型。所以两种差别极大的生物产生的后代在整体构造上会趋于接近以至相同，这很难令人相信。如果这样的事情发生过，那么在相隔很远的地层中应该能够找到非遗传因素造成的相同类型。但考察相关证据，得出的结论正好与此相反。

我的学说中有一个观点是，自然选择的连续作用和性状不断趋异会使物种一直处于增加的状态，对此沃森先生是表示反对的。因为根据无机条件我们可以知道，许多物种很快就能适应各种不同的温度、湿度等条件。我觉得，生物间的相互关系比无机条件的作用更重要。在任何地区内，有机条件都会随着物种数量的增加而变得更复杂。生物构造上有利变异的数量，初看起来似乎是无限的，所以产生的物种可能也是无限的。我们并不知道，生物最繁盛的地区是否已经被各类型物种所占满；许多欧洲的植物仍能在好望角和澳洲归化，尽管那里的物种数量如此惊人。可是，从地质学来看，从第三纪早期以来，贝类物种就没有大量增加；而从第三纪中期开始，哺乳动物的物种也没有再大量增加，甚至可能根本没有增加。为什么物种的数量并没有无限增加呢？一个区域能承载的生物个体数量（非物种数量）必定是有限的，这与当地的自然条件密切相关。因此，如果在一个地区生活的物种数量很多，则每个物种的

个体数量就会很少。当气候恶化或敌害增加时，这样的物种很容易灭绝，且灭绝的过程极快，但是新物种的产生却是很缓慢的。我们可以假设：如果英格兰的物种数量与生物个体数量相同，一个严寒的冬季或酷热的夏季就会使成千上万的物种灭绝。在任何一个地区，如果物种数量无限增加，那么每个物种个体数量都会变得稀少。如前所述，稀少物种产生的变异少，形成新物种的机会也就少了。一旦任何物种变为稀少物种时，近亲交配又会加快它灭绝的速度。许多学者认为，以上观点可以用来解释立陶宛的野牛、苏格兰的赤鹿及挪威的熊等物种的衰亡现象。最后，我认为最重要的因素是优势种。一个优势种如果在本土已经打败了许多竞争对手，一定会扩展自己并取代其他物种。德康多尔曾证实，广泛分布的物种往往会更积极地扩展地盘，它们会在一些地方取代并灭绝一些物种，这就阻止了地球上物种的大量增加。最近，胡克博士指出，澳洲的东南端有大量来自世界各地的物种入侵，导致澳洲本土的物种大大减少。在此，我不想讨论这些观点的价值，但总结起来可以发现，在任何地区，这些因素都会阻止物种的无限增加。

摘要

在不同的生存条件下，几乎生物构造的每一部分都会表现出个体差异；由于生物都在按照几何级增长，在某个年龄、某个季节或某个年份一定会存在激烈的生存斗争，这是不容置疑的。考虑到所有生物之间相互关系及其生活环境的无限复杂性，导致结构、体质和习性上的无限有利变异，如果有利于生物本身的变异从未像人类经历过的许多有利变异那样发生过，那也太离奇了。但是，如果确实发生了任何对生物有利的变异，那么可以肯定的是，拥有这种有利变异将有最大的机会在生存斗争中被保留下来；从强大的遗传原理看来，它们将倾向于产生具有类似特性的后代。为了简洁起见，我将这种保存有利变异的原理，即适者生存原理，称为自然选择。自然选择不断改善生物与其有机和无机的生活环境之间的关系。在大多数情况下，它能使生物体制进化。但如果低等、简单的类型能很好地适应其生活环境，它们也可以长久地保持不变。

根据在相应年龄继承特性的原理，自然选择可以像选择成体一样，

很容易地对卵、种子或幼虫进行改变。在许多动物中，性选择将有助于普通选择，通过让最健壮和适应能力最强的雄性产生最多的后代。性选择还能使雄体获得有用的性状，促使其与其他雄体斗争或对抗。这些性状会根据一般的遗传形式遗传给单性或者雌雄两性后代。

自然选择是否真的在自然界中发挥了作用，从而使各种类型的生命去适应它们的几种生活环境和场所，这个我们会根据下一章中的内容和例证去判断。我们已经知道自然选择是如何引起灭绝的；地质学清楚地表明，灭绝在世界历史上的作用有多大。自然选择也会导致性状分异；因为在构造、习性和体质上的差异越大，同一地区可以容纳的生物就越多；通过观察任何小地区的生物或外地归化的生物，我们都可以证明这一点。在任何一个物种后代的变异过程中，以及在所有物种不断为增加数量而进行斗争的过程中，这些后代性状分异越多，它们越有可能在生存斗争中获得成功。因此，区分同一物种不同变种的细微差异，会趋于稳定增长，直至扩大为区分同属内物种甚至是不同属的更大差异。

每个纲的大属中那些常见的、分布最广泛的物种，通常都是变异最大的；而且这些优势会遗传给其变异了的后代。如前所述，自然选择会导致性状分异以及使很少变异的中间类型灭绝。我相信，根据这些原理，可以解释世界上各纲内任何生物间的亲缘关系以及彼此之间存在的明显差异。令人感到奇怪的是，在整个时间和空间内，所有动植物都可以被归纳到不同的类群中，而且在群内建立联系，正如我们通常看到的那样。也就是说，同一物种的不同变种之间关系最密切，同一属的不同物种之间的关系比较疏远且不均等，形成了生物的组和亚属；不同属的物种之间的关系更疏远，而且根据属间关系的亲疏程度，形成了亚科、科、目、亚纲及纲。无论哪个纲内，总有若干附属类群不能列入单独的行列，它们围绕着某些点，这些点又和其他一些点相互环绕，长此以往，就形成了无穷的环。如果每个物种都是独立创造的，则无法解释上述分类情况；然而，正如图所示，只有遗传以及造成灭绝和性状分异的自然选择的复杂作用，才能解释这一点。

我们可以用一株大树来表示同一纲内生物间的亲缘关系。我相信这个比喻在很大程度上反映了真实情况。绿色发芽的树枝可以代表现有物种；过去长出的枝条可以代表长期的、先后灭绝的物种。在每个生长阶

段，所有正在生长的树枝都试图向四面八方分支，覆盖住周围的树枝并使它们枯萎，就像物种和物种群体试图在生存斗争中超越其他物种一样。大树在幼小阶段时，现在的主枝曾经是刚发芽的小枝条，后来主枝分出大枝，大枝又分出小枝。这种通过分枝连接的旧芽和新芽的关系，代表了所有灭绝的和现有的物种在互相隶属的类群中的分类关系。当这棵大树还很矮小时，那些繁茂的小枝条中只有两个或三个可以成长为大枝，幸存下来并支撑起其他所有树枝。远古的地质时期生存的物种也是如此，其中只有少数能够遗传下现存的变异后代。在这棵树初生时就有的主枝和大枝，很多都已经枯萎脱落了。这些脱落的树枝可以代表那些现如今已没有留下存活的后代，只能依靠化石去考证的当时的目、科和属。偶尔我们会看到一个细小而散乱的树枝从大树低矮处冒出来，由于某种有利的条件，至今还在茂盛地生长着。这就像我们偶尔会看到诸如鸭嘴兽或肺鱼那样的动物，在某种程度上通过其亲缘关系连接了两个较大的生物分支，因为生活环境中有可以庇护它们的场所，所以能使它们避免残酷的竞争。当大树长出新芽时，这些新芽如果很强壮，就会生长出枝条并覆盖住周围较弱的枝条。所以我相信，巨大的代代相传的“生命之树”也是这样，它用掉落的枯枝填充了地壳，并用不断生长的美丽枝条覆盖了大地。

第五章：变异的法则

环境改变的影响

有些人会认为变异是偶然发生的——家养状态下的生物变异是普遍且多样的，而在自然状态下相对较少。显然，这种理解是不正确的，但却说明我们对引发各类特殊变异的原因毫无所知。一些学者认为，生殖系统的机能使个体产生差异或使结构上产生非常细微的变化，正如父母与孩子之间一样。与自然条件下相比，在家养条件下出现的变异和畸形的状况更加频繁，而且分布广的物种要比分布狭窄的物种的变异性更大。由此可知，变异性通常与生物的生存环境有关。我已经在第一章中提到过，环境变化以两种方式产生作用，一种是对生物体的部分或整体直接地发生作用，一种是通过生殖系统间接地发生作用。在生物界中，有两种引起变异的因素，一种是生物本身，另一种是外界环境，前者的作用更为显著。外部条件的改变会直接产生定向或者不定向变异。在不定变异中，生物体处于可塑状态，其变异性往往很不稳定。而在定向变异中，生物可以适应一定的环境，并且使所有个体或大多数个体通过同样的方式发生变异。

气候、食物等环境因素的变化，对生物变异产生多少直接影响，是很难确定的。但我们有理由相信，在时间的推移中，我们会发现，环境的作用产生的实际效果，比事实能证明的效果要更大。另外，我们也有充足的理由认为，在自然界中各类生物间看到的无数构造复杂的相互适应，绝不能单纯地归纳为外界环境的作用。以下几种情况中，外部条件似乎产生了一些细微的效果：福布斯自信地说，比起更北部或更深处的同一物种的贝壳，位于南端的以及生活在浅水中的贝壳的颜色更鲜艳，但也不是全都如此；古尔德认为，与在岛上或海岸附近生活的鸟相比，生长在陆地空旷大气中的同一种鸟的颜色更鲜艳；同样，对于昆虫来说，沃拉斯顿深信海滨环境会影响它们的颜色；穆根-唐顿曾列出一大串植物，证明生长在近海岸的植物，其叶片肉质比生长在别处的更肥厚。

这些奇特的现象体现了生物的定向性，即同样环境条件下生活的同一物种的不同个体，常常具有相似的特征。

当变异对生物作用不大时，我们很难确定其中多少归因于自然选择的累积作用，多少归因于生活环境的影响。众所周知，相同物种的动物生活的地区越靠北，它们的毛皮就越厚实。但是，谁又能说清楚，这种皮毛上的差异，有多少是基于毛皮最温暖的个体对有利变异的累积，又有多少是基于寒冷气候的影响呢？因为气候似乎直接影响了家畜的皮毛。

许多实例都能表明，同一物种在不同环境条件下能产生相似的变种；也有一些在相同环境条件下生活的物种，却不会产生相似的变种。另外，每个博物学家都知道，有些物种生活在极端相反的气候条件下仍能保持纯种或根本不发生变异。这些事实让我意识到，相较于周围环境对变异的直接影响，某些我们完全不知道的原因引发的生物本身的变异倾向反而更重要。

从某种意义上来说，生活环境可以决定哪个变种可以生存下去，生活环境不仅能直接地或间接地产生变异，同样也能对生物进行自然选择。我们可以很明显地看出，当人类进行选择时，上述两种变异的差别很明显；人工选择通常是选择已经发生的变异，再按照人类的意志使其朝着一定方向累积；后一作用就与自然状况下适者生存的作用一致。

用进废退与自然选择，飞翔器官与视觉器官

从第一章提到的事实来看，我认为毫无疑问的是，家畜经常使用的器官会更强大，而不使用则会退化；并且这类变化是可以遗传的。在自然环境下，我们没有比较标准来判断长期连续使用或不使用的效果，因为我们不知道祖先的类型；但是许多动物的结构都可以通过不常使用而退化来解释。正如欧文教授所说，自然界中没有比不能飞的鸟更奇怪的现象了；但有几种鸟确实是处于这种状态的。南美洲大头鸭只能在水面上拍打它的翅膀，这几乎与家养的艾尔斯伯里鸭一样。坎宁安先生说，这种鸭在年幼时是会飞的，长大后就失去了这种能力。因为在地上觅食的体型较大的鸟，除了逃避危险之外，很少用到翅膀。因此我相信，现

在或者不久之前在海岛上生活的几种鸟类，翅膀都不发达，可能是因为海岛上没有天敌，所以它们很少使用翅膀而退化了。鸵鸟确实栖息在大陆上，并处于危险之中，无法通过飞行逃避危险，但是可以通过爪子来防御敌人，就像那些四足兽类一样。我们可以想象一下，鸵鸟祖先和鸨类有相似的习性，但是在连续世代中，鸵鸟的体积和体重不断增大，爪子使用得比较多，而翅膀使用得比较少，最后就无法飞翔了。

柯比曾指出（我也观察到了相同的事实），许多雄性食粪蜣螂的前足跗节经常折断。他检查了自己收藏的17个标本，发现没有一个留有前足跗节的痕迹。有一种蜣螂，由于其前足跗节常常断掉，以至于被描述为不具有跗节了。其他属的一些个体虽然有跗节，但也发育得不完全。被埃及人奉为神圣的甲虫蜣螂，其跗节也是发育不良的。没有足够的证据可以证明，偶然的损伤是否会遗传。但我们也不能否认布朗西卡观察到的事实：豚鼠手术后的特征可以遗传。因此，蜣螂前足跗节的缺失或发育不良，并不是肢体残缺的遗传，最恰当的解释是由于长期不使用造成的退化。因为许多食粪类的蜣螂，失去跗节都发生在生命的早期，所以这类昆虫的跗节应是一种不太重要或不经常使用的器官。

在某些情况下，我们很容易把全部或者主要由自然选择引起的构造变异，当作不使用的缘故。沃拉斯顿先生发现了一个引人注目的事实，即居住在马德拉岛的550种甲虫中，有200种甲虫的翅膀是残缺的，因而无法飞行。在当地29个特有属中，至少有23个属的物种与之类似！世界上许多地方的甲虫经常被吹到海上而死亡；沃拉斯顿先生观察到，马德拉岛的甲虫隐藏得很好，只在风和日丽的天气才出来；在没有遮蔽的德塞塔什岛，无翅甲虫的比例比马德拉群岛上的大；还有一个非常特别的事实，沃拉斯顿先生对此非常重视，即在其他地区非常多的必须使用翅膀飞翔的甲虫，在马德拉群岛几乎没有看见。以上几个事实使我相信，如此多的马德拉甲虫出现无翅的状况，主要是由于自然选择的作用以及长期不使用造成的退化。翅膀退化了的甲虫，由于丧失了飞行能力，可以避免被风吹向大海；另一方面，那些会飞行的甲虫通常会被吹到海里，因此被灭绝了。

马德拉群岛有些昆虫不在地面觅食，比如以花朵为食的鞘翅目昆虫和鳞翅目昆虫，它们必须使用翅膀来维持生存。正如沃拉斯顿先生猜测

的那样，它们的翅膀根本没有缩小，反而有所增大，这与自然选择的作用是相符合的。因为当新昆虫来到岛上时，自然选择增大或减小翅膀的趋势，取决于大多数个体是通过战胜海风来生存，还是通过少飞或者不会来生存。

鼹鼠和若干穴居啮齿类动物的眼睛是残缺的，甚至在某些情况下会被皮毛遮盖住。眼睛的这种状态可能是由于不使用而逐渐退化，但也许自然选择也发挥了作用。在南美，有一种啮齿类动物栉鼠，它的穴居习性比鼹鼠更强。经常抓到它们的西班牙人告诉我，它们的眼睛通常都是瞎的。我曾经保存过一个活的此类动物，它的眼睛确实是这样，通过解剖显示，它眼睛会瞎的原因是瞬膜发炎。对于任何动物来说，频繁地发炎都会对眼睛造成伤害。然而，眼睛肯定不是生活在地下的动物必不可少的。因此在这种情况下，眼睛变小、上下眼睑粘连，而且有毛长在上面，对这类动物来说可能是有利的。这样的话，自然选择就会对不使用的器官产生作用了。

众所周知，生活在卡尼俄拉和肯塔基的几种穴居动物，虽然分属几个截然不同的纲，但是它们的眼睛都是瞎的。有一些螃蟹，尽管眼睛消失了，眼柄却仍然存在，就像望远镜失去了玻璃片而镜架却依然存在的情形。很难想象，尽管眼睛没有用，也不会对生活在黑暗中的动物造成任何伤害，所以我将眼睛退化的原因归结于不使用。有一种失明的动物洞鼠，西利曼教授在距洞口约800米（半英里）的地方（并非洞穴最深处）捕捉到两只洞鼠，它们的眼睛大而有光。西利曼教授告诉我，当这两只洞鼠在逐渐加强光线的环境中生活大约一个月以后，就可以蒙眬地看见周围环境了。

很难想象，还有与石灰岩深洞相似的生活环境。从普遍的观点来看，瞎眼动物来自美洲和欧洲的山洞，可以预料这些动物在构造和亲缘关系上应该非常接近。但是如果仔细观察两处洞穴内的动物，就会发现事实并非如此。仅就昆虫而言，喜华德说，“我们不能用单纯的地方性眼光来观察这些现象，马摩斯洞和卡尼俄拉各洞虽有少数相似的动物，但仅仅能表明欧洲与北美动物群之间存有一定的相似性而已。” 在我看来，我们必须假设，具有正常视力的美洲动物，数代从外部世界慢慢迁移到肯塔基州洞穴越来越深的地方，正如欧洲动物也迁入了欧洲的洞穴

一样。这种习性的慢慢改变，我们也有一些证据。正如喜华德所说："那些在地下生活的动物，我们将其看作受邻近地方地理限制的动物群的小分支。一旦它们迁入地下，在黑暗中生活，就逐渐适应了黑暗的环境。但是刚转入地下生活的动物，与原动物群差异很小。它们首先要适应光明到黑暗的过渡，然后再慢慢适应微弱的光线，到最后完全适应黑暗环境，它们的构造也会变化。" 我们应该认识到，喜华德的这些话是针对不同物种，并非同一物种。当一种动物经过若干代迁移到地下最深处生活时，眼睛由于不使用，会或多或少地退化，而自然选择通常会影响其他构造的变化，例如增长的触角或者触须，用以补偿失去的视觉。尽管发生了这样的变化，我们仍能看到，美洲大陆动物和穴居动物、欧洲大陆动物和穴居动物之间存在着亲缘关系。正如我从达纳教授那里听到的那样，某些美洲洞穴动物就是这种情况。一些欧洲洞穴昆虫与周围地区的昆虫息息相关。如果用上帝独力创造的观点看待两大洲上瞎眼的穴居动物与大洲上其他生物的亲缘关系，就无法做出任何合理的解释了。两大洲几种穴居动物的关系应当是相当密切的，我们可以从欧美两大陆上一般生物间的关系推测出这一点。有一种叫盲目埋葬虫的生物，它们大多数生活在离洞穴很远的阴暗岩石上。因此，该属内穴居动物视觉器官的消失，似乎与黑暗环境没有关系。因为它们的视觉器官早已退化，更容易适应穴居生活。墨雷先生曾观察到，盲步行属也具有这种显著的特征，该属昆虫除穴居之外，尚未在其他地方被发现过。但是生活在欧洲和美洲某些洞穴里的物种却与此不同，可能是这些动物的祖先在丧失视觉之前，在两个大陆上分布较广泛。不过那些在大陆上生活的都已经灭绝了，只留下了隐居在洞穴里的。某些穴居动物应该非常独特，但是这丝毫没有让人感到惊讶，如阿加西斯提到过的盲鱼以及欧洲的爬行动物盲螈（现在已将其划分为两栖类）。唯一令我惊讶的，也许是由于这些在黑暗中生活的生物个体不多，彼此间生存竞争没有那么激烈，因此没有保留太多的古代生物残骸。

气候驯化

植物的习性能够遗传，例如开花期、休眠期、种子发芽所需的雨水量等，这使我不得不说一些气候驯化的问题。同一属的物种居住在非常炎热和非常寒冷的地区的情况都非常普遍，如果同一属的所有物种都来

自同一个亲种，那么在长期繁衍的过程中，气候驯化必定会发生作用。众所周知，每个物种都可以适应本土的气候，但是寒带或温带地区的物种却不能适应热带气候，相反也是如此。同样，许多肉质植物不能忍受潮湿的气候。但是，人们常常高估了某些物种对气候的适应能力，可以从以下事实推测出来：我们往往无法预测新引进植物是否能适应当地的气候；我们也无法预知，从不同地区引进的动植物，能否在这里健康成长。我们有理由相信，在自然环境下，物种之间的生存斗争限制了它们的地理范围。这种生存斗争类似于物种对特殊气候的适应性，前者的作用或许更大些。尽管生物只能适应一定的生存环境，但对于少数几种植物，有证据表明它们能适应不同的气候环境，即气候驯化。胡克博士从喜马拉雅山脉的不同高度采集到同种松树和杜鹃花的种子，在英国种植后，发现它们的抗寒能力不同。思韦兹先生告诉我，他在锡兰岛也观察到类似的情况。沃森先生对从亚速尔群岛带到英国的欧洲植物进行了观察，也发现了类似的情况。除此之外，我还可以列举一些别的例子。关于动物，也可以给出几个真实的案例：在某些历史时期内，一些物种的生存范围曾经从较暖的低纬度地区迁移到了较冷的高纬度地区，反之亦然。但是我们不能肯定这些动物是否严格适应了本土的气候，我们也不了解这些动物在迁移之后是否能适应新环境。

我相信家畜最初是由未开化人驯养的，并不是因为它们可以进行长距离的运输，而是因为它们非常有用，并且在家养的条件下易于繁殖。家养动物不仅能够适应不同的气候，还可以在这样的气候下繁育。由此，我们可以推论，现在生活在自然环境下的动物，很多类型都可以适应各种气候环境。但是，由于某些家畜可能来自几种野生种群，我们决不能将上述观点推得太远。例如，热带狼和寒带狼的血统可能混入了家养犬中。老鼠和鼷鼠不能被视为家畜，但它们是由人带到世界各地的。而现在，与其他啮齿类动物相比，它们的分布范围要广得多。它们既能生活在北方法罗群岛寒冷的地区，也能在南方马尔维纳斯群岛及热带的许多岛屿上生活。因此我认为，适应任何特殊的气候是大多数动物共有的能力。根据这种观点，人类和家养动物都具有能够忍耐不同气候的能力。例如已经灭绝的大象和犀牛能够忍受冰川气候，而现存的种类都属于热带或亚热带生物。我们不应将其视为异常，这只是在非常特殊的情况下表现出适应性的例子。

一个物种对任何特殊气候的适应程度，有多少是由习性造成的，又有多少取决于对具有不同构造的变种的选择作用，抑或是两者的共同作用，我们很难弄清楚。无论是通过类推，还是通过许多农业著作和中国古代书籍中提出的建议，我们都可以知道，在将动物从一个地区转移到另一个地区时要非常谨慎。因此，我必须相信习性会对生物产生一定的影响。因为人类不太可能成功地挑选出如此多的特别适应其所在地区环境的品种和亚品种；我认为这一定是由于习性的原因。另一方面，我没有理由怀疑，自然选择将继续保存那些天生最能适应居住环境的个体。在关于多种栽培植物的论文中记载，某些变种比其他变种更能适应某些气候。这在美国出版的关于果树的著作中非常明显地体现出来，某些变种建议种植在北方，而南方则建议种植其他变种。并且由于这些变种中的大多数是近代培育出来的，因此不会因为习性上的不同而影响它们体质上的差异。菊芋曾经被举例为气候驯化对物种无用的证据，在英国，菊芋从来没有通过种子繁殖过，因此不能产生新的变种，至今它们的植株都很柔弱。也有人以菜豆为例，而且更具有说服力。但是除非按照下面的方法做过，否则不能说他曾做过这个实验：首先要提早播种菜豆，让霜冻破坏大部分植株，然后从少数幸存的菜豆中收集种子；然后再以相同的方式种植；要一直留意不能出现杂交的情况，如此循环往复；经过二十代后，连续的种植才算完成了。我们无法确定菜豆的幼苗本身是否有差异，因为已经有报道说，有些幼苗看上去比其他幼苗更耐寒，我也曾亲眼见过这类明显的事例。

总的来说，我们可以得出结论：在某些情况下，生物的习性和器官的用进废退，在生物体构成和各种器官结构的变异中起了相当大的作用；但是用进废退通常与自然选择结合在一起，有时甚至被自然选择控制。

相关变异

相关变异是指生物的各部分在成长和发育过程中紧密地联系在一起，以至于当任何一个部分发生细微变异并通过自然选择而积累时，其他部分也会发生变异。相关变异是一个非常重要的问题，但我们对它的理解并不充分，并且常常和其他事实混淆。下面，我将谈到遗传常常表

现出的相关变异的假象。最明显的情况是，仅仅为动物幼体或幼虫的利益而积累的变异将影响成体的结构。在动物胚胎早期，由于身体上一些构造相同，所处环境又大致雷同，似乎最容易发生相同的变异。例如，在身体的左右两侧发生同样的变异；前腿和后腿，甚至下颚和四肢，都同时发生了变异，因为某些解剖学家认为，下颚与四肢是属于同源构造。我毫不怀疑，这些趋势或多或少地受自然选择的控制。曾经有一群鹿，鹿角仅长在一侧；如果这对鹿有很大的用处，那么它可能会由于自然选择而永久保留下来。

正如一些学者指出的，同源部分趋向于结合。这一点在畸形植物中经常见到。在正常构造中，花瓣的管状结合是一种极常见的同源器官结合。生物中坚硬的部分似乎能影响相邻的柔软部分的形态。一些作者认为，鸟类骨盆形状的多样性会导致其肾脏形状的显著差异。另外有一些学者认为，因为压力的原因，人类母亲的骨盆形状会影响婴儿的头部形状。据施莱格尔说，蛇类身体的形状和吞咽方式决定了最重要器官的位置和形状。

这种相关变异的性质通常非常模糊。小圣提雷尔曾强调指出，我们还无法解释为什么有些畸形构造常常共存，而有些却很少共存。例如，白猫的蓝眼睛和耳聋之间的关系；猫的玳瑁色和雌性之间的关系；鸽子足上的羽毛外趾间蹼皮的关系；幼鸽绒毛的多少与将来羽毛的颜色之间的关系；还有，土耳其裸犬的毛与其齿之间的关系。在上述这些奇特的关系中，同源无疑起到了一定的作用。对于最后那种情况，我认为这一定不是偶然的，因为哺乳动物中皮肤特别的鲸目与贫齿目都长有最异常的牙齿。可是，正如米瓦特先生所说，这一规律存在许多例外，因此它的适用范围很小。

据我所知，菊科和伞形科植物在花序上内外花的差异更适合阐明相关变异规则的重要性，而与用进废退及自然选择作用无关。我们都知道，雏菊的中央花与边花是有差异的，这种差异往往伴随着生殖器官的部分或完全退化。但是，在这类植物中，有些种子的形态和纹路也有差别，一些学者将这些差异归因于总苞对边花的压力，或者它们彼此之间的压力，而一些菊科植物边花种子的形状也证明了这一点。但是，正如胡克博士告诉我的那样，就伞形科的花冠而言，花序最密的物种中，内

花和外花出现的差异最大。也许有人认为，边花的发育需要生殖器官输送养料，这样就会造成生殖器官发育不良。但是，这并不是唯一的原因。在某些菊科植物中，外部和内部小花的种子有所不同，但花冠却没有任何差异。可能这些差异与养料流向中心花和边花的多少有关。至少我们知道，在不规则的花簇中，最靠近轴的花朵通常最整齐。我还可以补充一个相关变异的实例：在许多天竺葵属的植物中，当花序的中央花上方两片花瓣失去浓色的斑点时，所附着的蜜腺就会完全退化；如果只有其中一瓣失去斑点，那么所附着的蜜腺就会缩短，但不会退化。

斯普兰格尔先生对于花冠发育的观点是可信的。他认为，边花的主要作用是引诱昆虫，这对植物的受精是有利且必需的。假如是这样的话，自然选择可能已经发挥作用了。但是，就种子的内部和外部结构上的差异而言，这些差异并不总是与花冠的差异相关联，似乎它们不可能以任何方式对植物有利。然而，在伞形科中，这些差异非常重要。根据老德康多尔先生的说法，该科植物的种子中有在外花直生而在内花弯曲的，他以这些特征作为该科植物的主要分类标准。因此，有些构造变化分类学家认为很有价值，这些变化可能完全受变异和相关法则的支配。而据我们判断，这对物种本身没有任何价值。

我们可能经常错误地将一群物种共有的、遗传下来的构造，当成相关变异所致。因为它们的祖先可能是通过自然选择获得了某种结构上的变异，并且经过几千代的发展，又有了一些不相关的变异。如果这两种变异已经遗传给具有不同习性的全部后代，自然会被认为它们在某些方面有内在的联系。因此，我毫不怀疑，其他相关变异的例子完全是由于自然选择作用的结果。例如，德康多尔指出，不开裂的果实里面从未发现过具翼的种子。我这样解释这个现象：除非果实是裂开的，否则种子不能通过自然选择而逐渐长翼。只有果实开裂需要风来传播种子时，能够被风吹起的种子才相对具有更大的生存机会。

生长的补偿与节约

老圣提雷尔和歌德在同时期提出了生长补偿法则或生长平衡法则；如歌德所言，“为了某一方面的花费，自然不得不在另一方面节约”。我认为这在一定程度上适用于家养物种：如果营养过多地流向某个部位或

器官，那么流向另一部位或器官的营养就至少不会过量。因此，很难让一头奶牛既产很多牛奶，同时身体又很肥胖。同一颗甘蓝变种，不能既长出茂盛而有营养的叶子，又结出大量的含油种子。当果实中的种子萎缩时，果实本身的大小和品质就会大大提高。而在家鸡中，头上有大丛毛冠的往往都长有瘦小的肉冠，而那些颚须多的家鸡，通常肉垂会很小。如果物种处于自然状态，生长补偿法则很难普遍适用。但是许多优秀的观察者，尤其是植物学家，都相信它的真实性。我不会在这里给出任何实例，因为我没有方法区分：哪一构造只是由于自然选择作用而发达的，而另一相关构造因为自然选择的作用或者不使用而退化的；也难弄清楚某一构造的过度生长是因为它剥夺了相邻部分的营养。

我认为已经提出的补偿实例以及其他一些事实，都可以归纳在一个更普遍的原则中，即自然选择一直在努力节约生物体的每个部分。如果生存条件发生改变，一些之前有用的构造可能变得不那么有用了，这个构造就会缩小，这对生物个体是有利的，不会浪费其营养来建设无用的构造。因此，我才能理解当初观察蔓足类时曾令我震惊的事实：当一种蔓足类寄生在另一蔓足类体内，并因此得到保护时，它的外壳或背甲差不多完全消失了。类似的实例还有很多。雄性四甲石砌属个体就是这样，寄生石砌属更是如此。其他蔓足类都具有极其发达的背甲，它是由头部前端三个重要的体节组成的，并且具有巨大的神经和肌肉。而那些因寄生而被保护的石砌属，头的前部明显退化了，仅在触角基部留有痕迹。如果节省了不用的大型复杂构造，对于每个物种的后代来说，绝对是有利的。因为在每个动物面临的生存斗争中，它们为了获得更好的生存机会，必须减少营养的浪费。

因此，我相信，从长远来看，当身体的任何构造变得多余时，自然选择作用都会使它缩小，但不会引起其他构造的相应增大。反之，自然选择可以促使任何器官增大，而无须缩小某些毗邻部分作为必要的补偿。

重复的、残留的低级构造容易变异

正如小圣提雷尔所说，在物种和变种中，如果将同一个体的任何构造或器官（如蛇的脊椎骨、多雄蕊花中的雄蕊等）重复多次，它重复的

次数就容易变异；相反的，同样的构造或器官，如果重复器官较少，就更具有稳定性，这似乎已经成为一种规律了。小圣提雷尔和一些植物学家进一步指出，重复的器官，在构造上也非常容易发生变异。这正是欧文教授所说的“生长的重复”，并且他认为这是低等生物的标志。上述观点似乎与博物学家的普遍看法是一致的，即在自然界中，低等生物比高等生物更容易发生变异。我认为这种情况下，所谓的低级是指生物的一些构造很少专门用于某种特殊功能。只要同一构造必须实现多种功能，我们也许可以发现为什么它容易发生变异，因为自然选择对这种器官比对专营一特殊功能的器官宽松。就好比一把有各种用途的刀，可以是各种形状；但是有特殊用途的刀，通常形状都是特定的。永远不要忘记，自然选择只在对生物有利的情况下才会发挥作用。

一般学者认为，退化的构造容易产生高度变异，以后我们会对这个论题进行讨论。我在这里仅做一点补充，它们的变异似乎是由于其无用性引起的，因此自然选择无法对这些变异发挥作用。

发育异常的构造容易发生变异

几年前，沃特豪斯关于发育异常的构造容易发生变异的说法曾引起了我的极大关注。欧文教授也观察并推断出了相似的结论。为了使人们相信上述结论的真实性，我必须列举出我搜集到的一系列事实，但无法在这里列出一长串实例。我只能说，这个观点是一个非常普遍的规律。可能有种种原因导致错误的发生，但是我希望我已经避免了所有能想到的错误。应该了解的是，该规律绝不适用于任何生物构造，只有在比较近缘物种的同一构造时，发育异常的构造才适用于这一规律。例如，蝙蝠的翅膀在哺乳动物中是最异常的构造，但是该规律不适用于这里，因为所有蝙蝠都有翅膀；仅当蝙蝠中的某一物种的翅膀比同属其他物种的翅膀发育得更显著时，这一规律才适用。此外，副性征以任何一种方式出现，这一规律都是非常适用的。亨特所说的副性征是指仅属于雌性或雄性的性状，这些性状与生殖作用没有直接关系。这一规律适用于雌雄两性，但是由于雌性的副性征通常不是很明显，因此该规律对雌性很少适用。毫无疑问，无论副性征以什么方式出现，都容易发生变异。但是，这一规律不仅适用于副性征，在雌雄同体的蔓足类中也得到了证

实。我在研究该类动物时，特别研究了华特豪斯的言论，并发现这一规律基本上完全适用。在另外一部作品中，我会列举出更好的例子。在这里，我仅简要举出一个例子，用来说明此规律可以广泛应用。无论从哪方面来说，无柄蔓足类的厣甲都是非常重要的构造，通常在不同的属中，它们之间只有很小的差异。但在四甲藤壶属的几个物种中，同源的厣甲却有很大的差异，它们的形状完全不同，即使是在同种的不同个体之间，差异也很大。因此，这些重要的器官在同种的各变种间呈现的差异，比不同属之间物种呈现出的差异要大得多。

某一地区同种鸟类之间的差异非常小，我曾经仔细地观察过它们。在我看来，上述规律也可以适用于鸟类。但是我无法确认这一规律是否适用于植物，由于植物的变异性，使得比较它们的变异的相对程度特别困难，那将严重动摇我对其真实性的信念。

当我们看到某一物种的任何构造或器官显著发育时，就会推论该构造或者器官对那个物种具有高度重要性；但是，在这种情况下，该构造或者器官很容易发生变异。为什么会这样呢？如果每个物种都是独立创造的，其各个构造如我们现在看到的一样，那么对此我们无法做出任何解释。但是，如果各群物种是从其他物种衍生而来的，并且已经通过自然选择发生了变异，那么我们可以获得一些启发。如果我们忽略了家养动物的构造或个体，并且不进行选择，那么这部分构造（例如金鸡的冠）或整个品种将不再具有一致的性状，可以说这个品种已经退化。在退化的器官、几乎没有特殊目的的特殊器官或者多型性生物群里，我们可以看到类似的情况。因为在这种情况下，自然选择要么完全没有发挥作用，要么就无法充分发挥作用，因此生物体还处于波动状态。但是，我们更应该注意的是，家养动物的构造，由于连续选择而正在迅速地发生变化，而且这些构造也是最容易发生变异的。通过观察同一品种不同个体的鸽子，我们可以发现，翻飞鸽的喙、信鸽的喙与肉垂、扇尾鸽的姿态与尾羽等，具有巨大的差异，而这些正是英国养鸽家目前主要关注的几个点。甚至在同一亚品种中，例如短面翻飞鸽，也很难繁殖出近乎完美的个体，因为它们的大多数个体都与纯种鸽的标准相去甚远。确实可以说，有两种力量一直在不断斗争：一方面是通过不断的选择来保持品种的纯粹，另一方面是返祖以及发生新变异的内在倾向。从长远来

看，前者会获得成功，但从优良短面翻飞鸽品种中，仍有可能会培育出普通粗劣的翻飞鸽。总之，只要迅速不断地进行选择，那些正在变异的部分必然会发生重大的变异。

现在让我们来讨论自然界的情况。与同属的其他物种相比，当某个构造在任何一个物种中显著发育后，我们可以得出结论，自从本属从各物种的共同祖先分出来以后，该构造已经发生了巨大的变异，并且这个时期不会很漫长，因为几乎没有物种能延续生存到一个地质纪以上。异常变异量是指非常巨大且长期持续的可变性，为了物种的利益，这种变异会一直通过自然选择不断积累。但是，由于异常发达的构造或器官的变异性很大，并且在一个不太久远的时期内可以持续很久，因此，作为一般规律，我们期望这些构造比长期保持不变的构造具有更大的变异性。我坚信情况就是如此，一方面是自然选择，另一方面是返祖和变异的趋势，两者之间的斗争随着时间的流逝将停止；而且发育最异常的器官也会稳定下来。因此，不管一个器官有多异常，都会按照同样的方式遗传给变异后代。例如蝙蝠的翅膀，按照我们的理论，必然在几乎相同的状态下存在了很长时间，因此比其他器官更不容易发生变异。只有在这种变异是相对较近发生并且异常巨大的情况下，我们才能发现所谓“发生着的变异性”。在这种情况下，通过继续选择以所需方式和程度变异的个体，以及通过继续拒绝倾向于恢复到以前的、放弃有返祖倾向的个体，变异性就可以稳定下来。

物种性状比属的性状更易变异

本题也适用上一节讨论的规律。众所周知，物种性状比属的性状更易变异。现在可以用一个简单的例子来说明：如果一个大属内，某些物种开蓝色花朵，而另一些物种开红色花朵，则颜色只是物种的性状，没有人会对蓝色花种变成红色或红色花种变蓝色感到惊讶；但是如果属内所有物种都开蓝色花朵，则颜色将成为属的性状，并且其发生变异将是不同寻常的情况。我之所以选择这个示例，是因为大多数博物学家提出的解释在这里都不适用。他们认为物种性状比属的性状更易变异，是因为在生理上，物种性状没有属的性状重要。我相信他们的解释是不全面的，或者只有部分是正确的，我在分类一章里还要提及这一点。关于物

种性状比属的性状更易变异，援引证据来支持几乎是多余的。我在博物学著作里屡次注意到，有人惊讶地谈到关于重要性状的事实：某些重要器官或构造，在物种的大群中通常非常稳定，然而在亲缘密切的物种中却有极大的差异，并且在同一个物种的个体中，也往往会发生变异。这个事实表明，当属级特征降为种级特征时，虽然其生理重要性没有改变，但通常已经容易发生变异了。同样的情况也适用于畸形：至少小圣提雷尔深信，同一属中不同物种的器官差异越大，则个体发生畸形的可能性就越大。

从每个物种被独立创造的观点来看，我无法解释为什么同属的各物种之间，构造相异部分比相似部分更容易发生变异。如果按照物种是特征明显及固定的变种的观点来看，我们就可以预期在最近发生了变异、彼此有差异的那部分构造，仍然会经常发生变异。或者可以用另一种方式来陈述：属的性状是指同属内所有物种在构造上彼此相似，而与近缘属在构造上不相同的性状。我之所以将这些特性归因于共同祖先的遗传，是因为很少有自然选择会以完全相同的方式去改变不同的物种，以适应不同的生活环境。所谓属的特性，是指各物种在从共同祖先分离出来之前已经遗传到的特性，经历了数代后没有变异或仅有少许变异，现在可能不会再变异了。另外，同属不同物种之间的相异特性为物种的特性。由于这些特性在从共同祖先分出来以后发生了变异，因而不同的物种之间有了差异；它们很可能仍然在发生变异，至少比那些长期保持不变的构造更具可变性。

副性征是非常容易变异的，这一点无须我详细说明，已为博物学者公认。同时，人们也认为，在生物群中，各物种的副性征差异比其他构造的差异要大，例如我们可以比较副性征明显的雄鸡与雌鸡之间的差异量，并以此来说明。副性征容易发生变异的原因尚不明确，但我们能够了解到副性征不能像其他特性那样稳定，这是因为性选择积累造成了副性征，而性选择不像自然选择那样严格，它不会引起死亡，只是减少占劣势的雄性的后代。不管是什么原因造成的副性征变异，由于性选择具有很大的可变性，因此其作用范围很广，并可促使同群内各物种副性征的差异量比其他方面更大。

一个值得注意的事实是，同一物种两个性别之间的副性征差异，通

常为同一属的不同物种之间相同构造上的差异。基于这个事实，我将列举两个此前提到过的例子加以说明，并且由于这些案例之间的差异具有特殊的性质，因此这种关系几乎不可能是偶然的。甲虫足部跗节的数目，通常是非常大的甲虫群体共有的特征；但是，正如韦斯特伍德所说，在木吸虫科中，这个变异非常大，即使在同种的两性之间也有差异；对于土栖蜂类来说，翅脉是最重要的特征，大部分土栖蜂类都有这些特征，但某些属的不同物种之间以及相同物种的两性之间却出现了差异。卢伯克爵士也指出，一些小形甲壳类动物例子能够极好地解释这一规律。他说："角镖水蚤属主要通过前触角和第五对附肢表现性征，而物种间的差异也主要体现在这些器官上。" 这种关系可以明确解释我的观点：我认为同一属的所有物种，即任何一个物种的雌雄两性，都肯定来自同一祖先。因此，如果共同祖先或其早期后代的某些构造发生了变异，这部分变异很可能会被自然选择和性别选择利用，使得这些物种适应自然体系中的不同位置，也促使同一物种的两个性别彼此适应，或者使雄性通过与其他雄性斗争来获得雌性。

最后，我得出的结论是，物种的特征即区别各物种的特征，比属的特征即属内所有物种共有的特征更容易发生变异；一个物种与同属别的种相比较，任何发育异常的构造，往往变异性更大；一个构造无论如何发育异常，如果是全部物种共有的，那么变异程度就不会很大；副性征的变异性很大，并且在近缘物种中的差异也很大；通过生物的相同构造，通常能表现出副性征的差异和普通物种间的差异；以上所有规则都是紧密联系在一起的。所有这些主要是由于同一群体的物种都来自共同的祖先，并且从它那里遗传到了很多共同点；与遗传已久且没有变异的构造相比，最近变异较大的构造仍可能继续变异；对于自然选择而言，通过时间的流逝，或多或少地抑制了返祖和进一步变异的趋势；性选择不像自然选择那样严格；通过自然选择和性选择都可以积累相同构造的变异，因此它可以被当作副性征，也可以被当作是一般特征。

不同的物种会表现出相似的变异；并且一个物种中的许多变种通常都具有近缘变种的某些特征，或者重现其早期祖先的某些特征。通过关注我们的家养品种，这些主张最容易被理解。在相距最远的地区中，最独特的鸽子品种分化出的亚变种中，有的头上有倒羽，有的足上长羽

毛，这些特征都是原始岩鸽没有的。因此，这些特征就是两个以上品种呈现的类似变异。球胸鸽经常出现14根或16根尾羽，可以被视为变异，对于另一品种孔雀鸽来说却是正常构造。我想没有人会怀疑，所有这些类似变异都是由几个品种的鸽子受到类似未知因素的影响时，从一个共同的祖先那里继承了相同构造和变异倾向。植物界也有类似的情况，如瑞典芜菁和芜菁甘蓝的膨大茎部，通常我们称之为根，有些植物学家将这两类植物列为通过对相同祖先的栽培而得来的两个变种。如果事实不是这样，那么这将是两个所谓的不同物种呈现出的相似变异；此外，还有普通芜菁也可以作为类似变异的例子假如根据每个物种是被独立创造的观点，我们应该将这三种植物的茎的相似性，归因于三个独立但密切相关的创造行为，而不是一个共同祖先以同样方式变异的结果。诺丹先生曾在葫芦科中观察到很多类似变异的例子，其他学者在谷类中也发现了类似的情况。最近，沃尔先生曾详细讨论过自然状态下昆虫的类似变异现象，并将其归于他的“均等变异法则”之中。

但是，对于鸽子，还有另一种情况，就是在各个品种中不时会有石板蓝色的品种出现，它们的翅膀上有两条黑带，尾端也有一条黑带，腰部及外尾近基部是白色。所有这些都具有岩鸽远祖的特征，因此我想没有人会怀疑这是一种返祖现象，而不是近期出现的相似变异。我们可能会相信这个结论：这些岩鸽远祖的特征颜色，很容易出现在两个颜色不同的品种的杂交后代中，说明它们并不是受到了外界条件的影响，而只是受到了遗传法则杂交作用的影响。

毫无疑问，一个令人惊奇的事实是，某些特征在消失了许多世代之后，也许是几百代之后还会重新出现。但是，如果一个品种只与其他某个品种杂交过一次，其后代（有人说是12代或者20代）偶尔都会表现出外来品种的特征。经过12代之后，从同个祖先承继的血液的比例仅为2048：1；然而，正如我们看到的，一般人认为这种极小比例的外来血液的保留带来了返祖的倾向。在没有杂交过的品种中，虽然它的双亲已经失去了祖代的某些特征，正如先前所说的那样，重现失去性状的倾向，无论是强是弱，仍然可以遗传给无数的后代，尽管有时候我们看到的可能正好相反。如果一个已在一个品种中失去的特征，在许多世代后重新出现，最可能的假设是，失去了几百世代的特征，并不是某一个个

体突然获得的，而是这种特征潜伏在每一世代中，直到遇到了有利的条件才会再次出现。例如，在勾喙帕布鸽中很少会有蓝色的品种，但是产生蓝色品种的潜在因素在每一世代中都存在，而且可以通过无数世代遗传下去，与无用或退化器官的遗传相比，这种遗传在理论上的可能性更大。但是，退化器官的再现，有时确实是因为遗传造成的。

假设由于同一属的所有物种都应该是由同一个祖先繁衍而来的，所以可以预料它们偶尔会以类似的方式发生变异，并导致两个或两个以上物种产生彼此相似的变种，或某一物种的变种与另一物种在某些特征上有些相似。在我看来，这另一物种只是一个特征显著且永久的变种。但是由此获得的特征可能不重要，因为根据物种的不同习性，所有重要特征的出现都会受到自然选择的控制。因此可以进一步推断，同一属的物种偶尔也会重现远祖的特征。但是，由于我们永远无法知道某个群体共同祖先的确切特征，因此也无法区分返祖特征和类似变异的特征。例如，如果我们不知道亲种岩鸽是不具毛腿和倒冠毛的，就无法判断家养品种中这些特征的出现到底是返祖还是类似变异。但是，我们可以从色带的数目来推论，蓝色羽毛是一种返祖现象。因为鸽子的色带与蓝色是有关联的，而一次简单的变异无法出现大量的色带。尤其是不同颜色的品种杂交时，常出现蓝色与其他不同颜色的品种，我们可以由此推断出上述结论。因此，在自然界中，虽然我们无法判断哪些是祖代特征的重现，哪些又是新的类似变异，但是，根据我的理论，会发现一物种的变异后代与同群其他物种具有相似的特征，这一点是无可怀疑的。

之所以识别变异物种困难，是因为变种与同属其他物种的特征相似。此外，在两个可疑物种之间还存在着许多中间类型，这表明，除非所有这些类型都被认为是独立创造的物种，否则它们在变异时已经获得了其他类型的某些特征。但是类似变异最好的证据是，特征稳定的构造或器官偶尔也会发生变异，导致其在某种程度上与近缘种的同一构造或器官类似。我已经收集了很多这样的案例，但是像先前一样，无法在这里一一列举。我只能不断重复，这种情况确实存在，而且非常值得注意。

在这里，我将提出一个奇怪而复杂的案例，它发生于同属的某些物种中，一部分是在家养状况下，一部分是在自然环境下，这是一个生物

的重要特征不受影响及返祖现象的实例。驴腿上有时有明显的横纹，就像斑马腿的一样。有人断言幼驴腿上的条纹是最明显的，从我的观察来看，这是事实。有时驴肩上的条纹是双数的，条纹的长度和形状都容易发生变异。据记载，有一头白色的驴子（并非患了白化病），其脊背上和肩上都没有条纹；而在深色的驴子中，这些条纹有时会非常模糊，甚至完全消失。据说，由帕拉斯命名的野驴，肩上有双重条纹。布莱思先生曾在一头野驴的标本上看到一条明显的肩条纹，它本来不应该有这种肩条纹；普尔上校告诉我，这个物种的幼驴通常在腿部有条纹，肩膀上的条纹却十分模糊。斑驴虽然像斑马一样，上体常具明显的条纹，但是腿上却没有。在阿萨·格雷博士绘制的标本图上，却有清晰的斑马状条纹出现在斑驴后足踝关节处。

我在英国收集了不同品种、各种颜色的马，还有肩上有条纹的例子。在暗褐色和鼠褐色的马中，腿上生有条纹的也不少见，栗色马就是一个例子。暗褐色的马，肩上有时会呈现出微弱的条纹，而我在一匹赤褐色马上也见过带有肩条纹的。我儿子仔细观察了褐色比利时拉车马，并且对我描述了该马，其双肩上都有两条并列的条纹，腿部也有条纹。我曾亲眼见过一匹灰褐色德文郡小马，其双肩上各有三条平行的条纹。有人告诉过我，在威尔士小马的肩上也曾出现过这样的情况。

在印度西北部的凯替华马，普遍长有条纹。为印度政府检查过该品种的普尔上校告诉我，没有条纹的马通常被认为不是纯种马。此马的脊背、腿上和肩上，通常都是有条纹的，肩上的条纹有时候是两条或者三条，脸的侧面有时也是有条纹的。条纹在小马驹上最明显，而有时在老马身上会消失。普尔上校也见过初生的灰色和赤褐色的凯替华马都有条纹。从爱德华兹先生给我的信息中，我也有理由怀疑，在英国赛马中，小马驹中的脊背条纹比在成年动物中更为常见。最近，我养了一匹小马，它是由赤褐色雌马（土耳其雌马和法来密斯雄马的后代）和赤褐色英国赛马杂交所生的。它产下一周时，它的臀部和前额都生出了很多极窄的暗色斑马状条纹，而腿部的条纹则不明显。不久之后，所有这些条纹就完全消失了。在此，我不再做进一步详细说明。但我要说的是，我在一些国家搜集了各种马生有腿纹和肩纹的例子，西自英国，东至中国，北起挪威，南至马来群岛，都有这些情况存在。在世界各地，这种

条纹在暗褐色和鼠褐色的马中最多，暗褐色包括的范围很广，从黑色到褐色，直至接近乳黄色，应有尽有。

我知道史密斯上校曾就此主题撰写过文章，他认为马的一些品种来自于若干原种，其中的一个原种就是暗褐色且有条纹的，并且上述外观都是由于在古代曾和这暗褐色马种杂交而产生的。我们可以对这个论点加以反驳，因为那些壮硕的比利时拉车马，威尔士矮种马，挪威矮脚马和瘦长的凯替华马，都生活在世界上相距很远的地方，如果说它们都曾和某个假设的原种杂交，这是不太可能的。

现在，让我们谈谈马属中几个物种的杂交情况。罗林断言，驴和马杂交所生的骡子，一般腿部都具有明显的条纹。根据戈斯先生的说法，美国有些地区的骡子，十之八九腿部都有条纹。我曾经见过一条骡子，它的腿有如此多的条纹，以至于任何人起初都以为它是斑马的杂交后代。在马丁先生一篇关于马的优秀论文中，绘有一幅类似的骡子图。我在四幅彩色的图画中看到了驴和斑马产下的杂种，它们腿上的条纹比身体其他部分的更明显，并且其中一幅图上画有两条并列的肩条纹。莫尔顿勋爵蓄养了一匹有名的杂种，为栗色雌马与雄斑驴所生，它与后来该栗色雌马与黑色阿拉伯雄马所生纯种的后代，腿部的条纹都比纯种斑驴明显得多。此外，还有一个引人注意的例子，格雷博士曾绘制过驴子与野驴所育杂交种的图（他告诉我，他还知道另一个相同例子）。这个杂种的四条腿上都有条纹，像德文郡褐色马及威尔士小马那样，其肩部还有三条短条纹，甚至在面部两侧也生有斑马状的条纹。我们知道，驴腿上只是偶然有条纹，而野驴腿上和肩上没有条纹。关于这最后一个事实，我坚信杂种面部的每一条斑纹的出现都不是偶然。我曾向普尔上校询问过凯替华马的面部是否有条纹，并且得到了肯定的回答。

现在我们要如何解释这几个事实呢？我们看到马属的几个非常独特的品种，通过简单的变异，可以像斑马一样在腿上长有条纹，或者像驴一样在肩上出现条纹。在马匹中，这种条纹在暗褐色品种中出现的可能性最大，而这种颜色接近该属其他物种普遍具有的颜色。条纹的外观并不伴随任何形式的变异或任何其他新特征的出现。我们还看到，这种趋势在几种最独特的物种之间的杂种中变得最明显。现在看看几种鸽子的情况：这几个品种均来自一种蓝色的鸽子（包含两三个亚种或地理

种），这种鸽子具一定的条纹或其他标志。如果任何品种的鸽子变异之后身体呈现蓝色，上述条纹及其他标志就会重现，但其他形态和特征都不会发生变化。假如不同颜色的最原始、最纯粹的品种进行杂交，其后代重现蓝色和条纹及其他标志特征的倾向最大。我曾说过，关于返祖想象，最合理的解释是：每一世代的幼体都有产生长期消失的特征的趋势，这种趋势有时由于未知原因会占优势。而且我们已经看到，在几种马属动物中，条纹在幼体中比在较老的个体中更常见。如果我们把那些保持纯种达数百年之久的家鸽称为物种，那么马属内的物种具有相似的特征。我可以大胆地猜测，千万代以前存在着一种动物，其条纹与斑马一样，但是其他方面的构造却不相同，它就是现在的家养马（无论是源自一个还是多个野生原种）、驴、野驴、斑驴和斑马的共同祖先。

如果有人相信每个马属内的各个物种都是独立创造的，那么任何物种被创造出来时就有一种趋势，即在自然界或家养条件下，都会按照一种特殊的方式进行变异，使得它像马属中其他物种一样具有条纹；而且，任何物种被创造出来时都会有一种强烈的趋势，即这些物种与生活在世界各地的物种杂交后，生出的带有条纹的后代与其父母并不相似，而是与同属中的其他物种相似。在我看来，一旦接受了这种观点，就等于否认了真正的原因，而去接受不真实的或未知的事实，这种观点夸大了上帝的作用；而我只能像老朽无知的神创论者们一样，相信贝类化石从未存活过，它们只是从石头里被创造出来的，以模仿今日在海边生活的贝类而已。

摘要

我们深感对变异法则的无知。各构造变异的原因，我们能解释的可能还不到百分之一。但只要我们使用比较的方法就可以看出，不论是同种中不同变种间的较小差异，还是同属中不同物种间的较大差异，同样都受到法则的支配。外部环境的改变通常会造成不稳定变异性，有时也会产生直接的和定向的变异，并随着时间的推移变得更加显著，但是我们还没有充分的证据证明这一点。习性可以产生特殊的构造，无论是经常使用的器官会强化，还是较少使用的器官会减弱和缩小，这些结论可以用于许多场合。同源构造趋于以相同的方式变异，并且趋向于结合。

硬体构造及外部构造的改变，有时会影响相邻软体构造或内部构造。当某个构造特别发达时，可能会从相邻构造汲取营养；而在不损害个体利益的前提下，多余的构造可能被废退。生命早期的构造通常会影响随后发育的构造；虽然我们还不太了解许多相关变异事实的性质，但毫无疑问，它们是会发生的。重复构造在重复次数和构造特征方面容易产生变异，可能是这部分构造并没有因为特定功能而专用的缘故，因此，它们的变异不受自然选择的支配。可能是同样的原因，低级生物比高级生物更容易发生变异。无用的退化构造不受自然选择的控制，因此更容易变异。物种特性比属的特性更容易发生变异，所谓物种特性是指区别同一属内各物种的性状特征，这些特性从各物种的共同祖先分出以后，常常会发生变异；属的特性是指遗传已久而没有发生变异的性状特征。通过观察我们可以推测，在近期发生了变异，彼此有差别的构造，还会继续变异。我在第二章中说过，这个推论也适用于整个群体。在某些地区，我们可以发现许多同属的物种，这表明这里曾发生过很多的变异和分化，或者产生了很多新的物种。因此，平均而言，现在这些区域内的物种会出现很多的变种。副性征特别容易发生变异，同属内各物种呈现出的副性征差异常比其他构造的差异要大。同一物种雌雄两性间副性征的差异，通常表现为同属的各物种之间相同构造上的差异。异常发达的器官构造比近缘种的相同构造更容易发生变异，因为从该属形成以后，它们就经历了极多的异常变异，由于这种变异是一个长期、缓慢的过程，因此自然选择还没有充足的时间来抑制变异的趋势和阻止变异的进程。假如一个物种具有特别发达的器官，并且已经产生了许多变异的后代（这是一个缓慢且长久的过程），不论这个器官发育得如何异常，自然选择都会使这个器官的特征保持不变。如果源自同一个祖先的许多物种继承了大致相同的构造，并在相似的环境条件下生存，就容易发生类似变异，有时还可能发生返祖现象。虽然返祖现象与类似变异并没有引起重要的新变异，但是这些变异在增进自然界的美丽和协调的多样性的过程中，也发挥了巨大的作用。

　　无论是什么原因造成了后代与亲代之间的差异，每一个微小的差异都必定有它的起因。我们有理由相信：任何构造中，与物种习性有关的变异都是由有利变异慢慢积累而成的。

第六章：学说的难点

在本章之前，读者已经遇到了许多疑难问题。其中有些问题如此之难，以至于我现在都一筹莫展。然而，按照我的推断，其中大部分难点都只是表面的。而那些真正的难点，对我的学说并不致命。

这些疑难和反对意见可以归为以下几类：

第一，如果物种是由其他物种经过不可思议的细微渐变演化而来的，为什么我们没有到处看到无数的过渡类型？为什么自然界的物种都不是混乱的，而是如我们见到的那样区别明显呢？

第二，蝙蝠那样的构造和习性，是否可能由构造和习性完全不同的其他动物变化而来呢？ 我们是否可以相信，一方面自然选择可以产生不重要的器官，例如用来驱蝇的长颈鹿的尾巴，另一方面又会产生像眼睛那样奇妙的器官？

第三，可以通过自然选择来获得和改变本能吗？在被知识渊博的数学家发现之前，蜜蜂就已经具备筑巢的本能，对此我们该如何解释呢？

第四，我们要如何解释不同的物种杂交时会不育，或者它们的杂交后代会不育？而同种间不同的变种杂交时，繁殖能力却没有受到损害呢？

这章我们先讨论前两个问题，下一章讨论其他难点，接着用两章分别讨论本能和杂种性质。

过渡变种的缺乏

由于自然选择仅通过保留有利变异而起作用，所以在生物密度很高的区域，每种新类型都趋向于取代并最终消灭比其改进较小的祖先类型，以及在竞争中受到不利影响的其他类型。正如我们已经看到的，灭

绝和自然选择齐头并进。因此，如果我们将每个物种看作其他未知类型的后代，那么，通常新类型在形成和完善过程中都会消除亲种和所有过渡变种。

但是，根据这种理论推断，必然存在过无数种过渡类型，可是为什么我们没有发现它们被大量地埋在地壳里呢？在“论地质记录的不完整”的章节中讨论这个问题将更加方便。在这里，我只想说，这一问题的答案主要在于，地质记录的不完全非一般人所能想象。地壳是一个巨大的博物馆，但是里面的收藏品并不齐全，并且在时间上也存在很大间隔。

当几个亲缘很近的物种生活在同一地区时，我们本应该找到许多过渡类型。让我们举一个简单的例子：当我们从北向南旅行，穿越整个大陆时，我们通常会发现，近缘物种或代表性物种占据着自然环境中几乎完全相同的位置。这些代表性物种经常会相遇并混合在一起；随着一个物种越来越稀有，另一个变得越来越繁盛，直到一个物种取代另一个物种。但是如果我们比较这些混合地段的物种就会发现，它们的每一构造细节都绝对不同，就像从各物种栖息的中心地带采集的标本一样。根据我的学说，这些近缘物种是来自同一个亲种；在变异过程中，每个物种都适应了自己所在地区的生存条件，已经取代并消灭了它的原始亲种以及过去和现在之间的所有过渡变种。因此，我们现在不应该期望在每个区域都能见到许多过渡变种，尽管它们一定曾经存在于该区域，并且可能以化石的状态埋藏在那里了。但是，在具有中间生存条件的中间地区，为什么我们现在没有找到联系紧密的中间变种呢？这个问题长期以来困扰着我，但是我相信整个问题基本上是可以解释的。

如果一个区域现在是连续的，就认定在很长一段时间内都是连续的。我们应该非常谨慎地做出这个推断。地质学使我们相信，即使在第三纪后期，几乎每个大陆都还被分割成各个岛屿。在这样的岛屿上，可能有中间变种的地区并不存在，因而单独形成了独特的物种。由于地貌和气候的变化，现在连续不断的海洋区域，在不久之前，一定不像如今这般连续一致。但是我不想借此逃避困难；因为我相信在原本严格连续的区域上，早已经形成了许多完全不同的物种；我毫不怀疑，在新种的形成过程中，尤其是在自由杂交和漫游动物的新种形成过程中，曾经分

隔而现在连续的地区发挥了重要的作用。

在考察物种分布情况时，我们通常会发现它们在大的范围内数量众多，然后在边缘处变得越来越稀有，直至消失。因此，两个代表物种之间的中间地带，往往比它们各自占有的区域狭窄。正如德·康多尔观察到的那样，在登山的过程中我们会看到，一种普通的高山植物会非常突然地绝迹，这点很值得注意。福布斯在用拖网探察深海时，也发现过同样的事实。对于那些将气候和生活的自然条件视为生物分布的决定因素的人来说，这些事实是如此令人惊奇，因为气候和高度或深度都是在不知不觉中逐渐改变的。但是，我们需要牢记，任何物种如果没有其他物种与之竞争，即使是在中心区域，个体的数量也会大大地增加；每种生物不是捕食其他生物，就是被其他生物捕食。简而言之，每个生物都以最重要的方式与其他生物直接或间接相关，我们必须看到，任何地方的生物分布范围绝不完全取决于逐渐变化的自然条件，而在很大程度上取决于其他物种的存在，这些物种有的是它赖以生存的，有的是它的敌害，有的是它的竞争者。并且这些物种界限分明，没有与其他类型相互混淆，任何物种的分布都取决于其他物种的范围，而且其界限也十分明显。此外，由于每个物种在其分布边缘存在的数量已经减少，在其天敌或猎物的数量波动时或者季节变化期间，极有可能被彻底灭绝；因此，物种的地理分布界限就更明显了。

生存于连续地域的近缘物种或代表性物种，一般各自都有大的分布范围，并且它们之间的中间区域相对狭窄，在这些区域中的物种个体也变得越来越稀少。然后，由于变种在本质上与品种没有什么区别，因此此规律可能会同时适用于两者。如果假设一个正在变异的物种栖息于一个非常大的地域，那么我们必须将两个变种分别适应于两个大的地区，而第三个变种适应于狭窄的中间区域。由于栖息地狭窄，这个中间变种的数量必然会减少。实际上，据我所知，该规则广泛适用于自然状态下的变种。在藤壶属里有一个显著例子，足以说明显著变种的中间变种这一规律。从沃森先生、阿萨·格雷博士和沃拉斯顿先生提供给我的信息来看，当出现介于其他两个变种之间的中间变种时，通常它的数量要比它相连接的两个变种少得多。现在，如果我们可以相信这些事实和推论，并承认通常连接两个变种的中间变种的数量要比其相邻的变种少，那么

便能明白为什么中间变种不能长期存在，而这也是它们常常比它原先连接起来的那些类型灭绝和消失得早的原因。

如前所述，对于数量较少的任何类型，被淘汰的可能性都比数量较大的类型更大；在这种特殊情况下，中间类型明显受到它两边存在的近缘类型的侵害。但我认为，还有一个更重要的考虑因素是，在进一步演变的过程中，两个变种将变为两个明显不同的物种，个体数量多且分布区域广的两个变种，一定会比生活在狭窄的中间地带且数量较少的中间类型的变种更占优势。在任何时期内，与个体数量较少的类型相比，数量较多的类型都有更多的机会产生更有利于自然选择的变异。因此，在生存竞争中，数量较多的普通类型便会击败和取代稀有的类型，因为后者的变化和改进更缓慢。正如第二章所讲，我认为同样的原理可以解释，为什么任何地方的优势物种要比稀有物种出现显著特征的变种多。我可以通过以下例子来说明我的想法。假设有3个绵羊变种，一个适应于广大的山区，一个适应于狭窄的丘陵地区，而第三个适应于广阔的平原；而且这些地区的居民都在尝试以同样的决心和技巧，通过人工选择来改良它们的种群。在这种情况下，与中间狭窄的丘陵地带的小农场主相比，山上或平原上的大农场主成功率更高，也能更快地改良其品种；因此，经过改良的山地或平原地区的品种将很快取代未经过改良的丘陵地区的品种；于是，原来数量较多的两个品种便会彼此衔接，而中间丘陵地带的变种会被取代而消失。

综上所述，我认为物种会成为界限分明的实体，而且在任一时期都不会由于无数变异连着的中间环节呈现一种混乱状态。这是因为：

首先，新品种的形成非常缓慢，因为变异是一个非常缓慢的过程；除非有利变异出现了，否则自然选择也无能为力；要是这个地区的自然结构中没有足够的空间，能让一个或多个变异了的生物更好地进入，自然选择同样无能为力。这样的新空间将取决于气候的缓慢变化或新个体的偶尔迁徙，也许，更重要的因素是，原有生物的某些个体经逐渐演变产生了新类型与旧类型之间的作用与反作用。因此，在任何区域、任何时间，我们应该只看到少数物种的某些结构在某种程度上永久发生了改变，我们也确实可以看到这一点。

其次，现在连续的区域，在距今不远的时期往往是彼此隔离的。其中许多类型，尤其是需交配繁殖和漫游甚广的动物，可能已经变得足够独特，可以称为代表性物种了。在这种情况下，几个代表性物种与其共同祖先之间的中间变种，以前必然存在于各分隔的地区，但是这些中间变种在自然选择过程中将被取代和灭绝，因此无法再看到它们的存在。

再次，当两个或两个以上变种在完全连续区域的不同部分形成时，中间品种很可能会首先在中间区域形成，但通常存在时间很短。对于这些中间变种，由于已经确定的原因（即近缘物种、代表物种以及已认可的变种实际分布的情况），要比与它们紧密相连的那些变种数量小。仅从这个原因来看，中间变种很可能意外灭绝；几乎可以肯定，在通过自然选择进行进一步改良的过程中，它们必然会被它们连接的类型击败和取代；因为它们的数量大且变异较多，通过自然选择进一步地改进，必然会获得更大的优势。

最后，如果我的学说是正确的，不是从某个时期而是从全部时期来看，那么，联系同一类群的所有物种的无数中间变种必然曾经存在过；但是，正如人们经常提到的那样，自然选择的过程总是趋向于消灭亲种和中间类型。因此，只有在化石残骸中才能找到它们先前存在的证据，正如我们将在以后的章节中要论证的那样，这些记录被保存在极其不完全且断断续续的地壳化石中。

具有特殊习性和构造之生物的起源和过渡

反对我的观点的人曾提出这样的问题：如何将陆栖动物转化成水栖动物？处于过渡状态的动物如何生存？要证明从严格的陆栖到水栖动物之间的各级中间类型的食肉动物现在依然存在，是很容易的。并且由于每个个体都在进行生存斗争，因此很明显，每个个体的习性都非常适合其在自然界中的位置。看一看北美的水貂，脚有蹼，毛皮、短腿和尾巴状似水獭。在夏季，这种动物会潜水并捕食鱼类；但是在漫长的冬季，它离开了冰冷的水域，并且像鼬鼠一样捕食老鼠和陆生动物。假若反对我的人问另一种情况，如何将食虫性四足动物转化成飞行蝙蝠，这个问题更加困难，我无法给出答案。

像在其他场合一样，这里对我很不利。因为在我收集的许多惊人案例中，我只能给出一个或两个在同一属的近缘物种中的过渡习性和结构的实例，以及在同一物种内无论是持续的还是多样化的多种习性。在我看来，只有列举无数的此类案例，才可以减少诸如蝙蝠这类特殊情况的难度。

试看松鼠科，有些松鼠只具有微扁平的尾巴，而另外有些品种，正如理查森爵士所说，它们的身体后部相当宽，侧面的皮膜也张开得很饱满。从这些品种到所谓飞鼠之间，有极其精细的中间等级。飞鼠的四肢，甚至尾巴的基部都与宽大的皮膜连接在一起，就像降落伞一样，使它们可以在空中从一棵树滑行到另一棵树上。我们必须相信，各种松鼠的每个结构在其生存地区都是有益的，使它能够逃离鸟类或猛禽的捕猎，或者更快地觅食，甚至可以降低它们偶然跌落的危险。但是，我们不能因此而认定，每个松鼠的结构都是在所有自然条件下可以设想的最佳结构。如果气候和植被发生变化，让其他竞争的啮齿动物或新的捕食它的野兽迁入，或者让原有的肉食动物发生变异，我们相信：至少有一些类型的松鼠的数量会减少或灭绝，除非它们也以相应的方式进行了构造上的变异和改进。因此，我们不难理解，尤其是在生存条件变化的情况下，那些侧腹膜变得越来越大的个体，都可以继续生存下去，其每次变异都是有用的，并且会被保留下来，直到通过自然选择的积累，产生了一种所谓完美的飞鼠。

我们再来看看猫猴，即所谓飞狐猴，以前被错误地列为蝙蝠类，现在将它归为食虫类。它的侧腹膜非常宽，从颚角一直延伸到尾巴，包括四肢和细长的爪子：膜内还生有伸张肌。虽然现在并没有适合空中滑翔的各级过渡构造的动物，将猫猴与其他食虫类构造的动物连接起来，但是不难推测，这些连接的中间类型曾经存在过，而且每种连接体都以滑翔不那么完美的松鼠那样的方式逐渐出现，并且各级中间构造对这些动物自身一定都是实用的。我们可以进一步得出结论，连接猫猴爪子和前臂的膜，由于自然选择已经大大地延长了。就飞行器官而言，这会将食虫类的动物转变为蝙蝠。有些蝙蝠的翼膜，从肩膀的顶部一直延伸到尾巴，包括后肢在内，也许从这样的构造中，我们可以看到一种原先较适合滑翔而非飞翔的构造的痕迹。

如果大约有12个属的鸟类灭绝或不为人所知，那么谁敢贸然猜测，下面这些类型的鸟类还存在呢？例如翅膀只用来拍打水面的呆鸭；翅膀在水中作为鳍而在陆地上作为前腿的企鹅；把翅膀当作风帆的鸵鸟；翅膀没有作用的无翼鸟。然而，每只鸟的结构在它所处的生存条件下都对它有利，因为每只鸟都必须为生存而斗争；但不一定在所有可能的情况下都是最好的。更不能从这些论述中推断出，这里提到的任何一个翅膀构造等级代表了鸟类在获得完全飞翔能力过程中实际经历的步骤，但是它们却至少表明了，可能会有多种过渡的方式。

看到诸如甲壳动物和软体动物这样在水中呼吸的动物，有少数种类可以生活在陆地上；又看到飞禽、飞兽、各种各样的飞虫以及古代会飞行的爬行动物，就可以设想，依赖于鳍的猛拍而上升到空中并且可以滑翔很远的飞鱼，也可能演变为有完全翅膀的动物。如果真的可以这样，谁能想到，在早期的过渡状态，它们曾经生活在大海中？就像我们熟知的那样，谁又会想到，起初它们的飞行器官是专门用来躲避其他鱼类的吞食的呢？

当我们看到针对任何特定习性而高度完善的结构时，例如飞鸟的翅膀，我们应该记住，显示出该结构的早期过渡类型的动物，几乎不会生存到现在，因为在自然选择的过程中它们已经被更完善的后代取代了。此外，我们可以得出结论，适应于不同生活习性的构造之间的过渡类型，在早期很少大量存在，也很少出现许多从属类型。因此，回到我们对飞鱼的假设中，能够真正飞翔的鱼类似乎不可能自从属类型发展而来，因为除非它们的飞翔器官高度完善，使它们在生存斗争中比其他动物更具有决定性优势时，才具有在陆地和水中以多种方式捕获各种猎物的能力。因此，在化石中发现具有过渡结构的中间类型的机会总是很少，因为它们的存在数量本来就少于结构完全发达的物种。

现在再举两三个实例，来说明同一物种不同个体之间习性的改变和趋异。当发生以下任何一种情况时，自然选择都容易使动物的构造适应于其已经变化的习性，或专门适应若干习性中的某一种。很难说是习性先改变然后引起了构造的变化，还是构造的变化引起了习性的改变，还是两者同时进行，这对于我们来说并不重要。有关改变习性的情况，仅以英国以外来的植物为食或专门靠人工食物的昆虫为例就足够了。关于

习性趋异的例子，可以列举无数个。我经常看到南美洲一种霸鹟像隼一样，在某地上空盘旋一阵之后，又飞至另一个地点的空中；有时候它静静地站在水边，然后像一只翠鸟急速冲入水中捕鱼。英国有一种大山雀，有时像旋木鸟一样攀爬树枝；而有时又像伯劳似的啄小鸟头部，来杀死小鸟。我多次看到或听到它敲击紫杉枝上的种子，以使种子破碎。赫恩在北美看到黑熊像鲸鱼似的在水中游了好几个小时，还会张大嘴巴捕捉水中的昆虫。

有时，我们会看到某些个体的习性，与它们同种或同属的其他个体的固有习性大不相同，我们便可以设想，这样的个体偶尔会形成新的物种，这个新的物种会具有异常的习性，并且其构造与正常类型相比或多或少会发生改变。而且这种情况确实在自然界中发生过。与啄木鸟能攀爬树木并在树皮缝中觅食虫子的情况相比，我们还能举出更具适应性的例子吗？ 然而在北美，有些啄木鸟主要以水果为食，而另一些啄木鸟的翅膀细长，以便在飞行时捕食昆虫。在没有树木生长的拉普拉塔平原上，也有一种啄木鸟，其两趾朝前，两趾向后，舌长而尖，尾羽又尖又细而且十分坚硬，足以使它在树干上保持直立，但是没有典型啄木鸟那么坚硬。此外，它的嘴挺直而有力，虽不如典型的啄木鸟的嘴那样笔直而坚硬，但也足以在树木上凿孔。因此，从这类鸟的主要构造来看，确实是啄木鸟，甚至在那些不重要的特征，例如颜色、粗糙的音调、起伏的飞翔等方面，也清楚地表现出与英国普通啄木鸟之间密切的亲缘关系。但是根据我本人以及阿萨拉的精确观察来看，我断定，在一些开阔的区域，这种啄木鸟并不攀爬树木，而是将巢穴筑在堤岸的洞穴内！然而据哈德森先生的说法，在别的地方，它经常在树林中飞翔，并在树干上凿孔筑巢。我还可以举另一个例子来说明这一属的习性变化情况，据德索热尔描述，墨西哥有一种啄木鸟，会在坚硬的树木上凿孔用来储藏栎果。

海燕是鸟类中最具海洋性和空栖性的，在火地岛宁静的海峡中，生活着一种叫倍拉獴的鸟，由于它的一般习性、惊人的潜水能力、游泳和飞翔的姿态，很容易被人误认为是一种海雀或□□。但是，它实际上是一种海燕，只是许多涉及其新生活习性的构造发生了显著的变化。而拉普拉塔的啄木鸟的构造只是发生了轻微的变化。另一方面，最敏锐的观察

者通过检查河鸟的尸体，永远也不会怀疑它是半水栖习性的鸟类。但是，这种鸟在起源上却与鸫科相近，以潜水为生：在水中用爪子抓住石子，并拍打它的双翅。昆虫中的一个大目膜翅类，全部都是陆栖的，只有卢伯克爵士发现的细蜂属的习性是水栖的。细蜂属的昆虫在水中时，通常是用翅而不是脚，并且可以潜在水下长达四小时之久。然而，它的构造却没有随着这种习性的变化而发生改变。

有些人相信生物被创造出来时的样子就是现在的样子，当他们偶然遇到一种动物具有的习性与其构造不一致时，一定会感到惊讶。鸭和鹅为了游泳形成的蹼足，没有什么例子比这更明显了。但是在高原地区生活的鹅，虽然有蹼足，却很少或者从不靠近水边。除了奥杜邦以外，还没有人见过四趾有蹼的军舰鸟会停留在海面上。另一方面，□□和白骨顶鸡尽管只在趾的边缘上长有膜，但二者都是显著的水栖鸟。涉禽目的鸟类，为了在沼泽和浮于水面的植物上行走，形成长而无膜的脚趾，还有比此更明显的事例吗？但是这一目内的苦恶鸟和秧鸡，却具有不同的习性。前者是水栖性的，和白骨顶鸡一样；而后者则是陆栖性的，几乎和鹌鹑或鹧鸪一样。我们还可以列举出很多类似的例子，来说明习性已经发生了改变而相应的构造却没有变化的情况。可以说，高原鹅蹼足的构造虽然还未发生变化，但几乎已是残留器官了。军舰鸟足趾间深凹的膜，说明其构造已开始发生变化了。

相信生物是经多次分别被上帝创造出来的人会说，这类情况是造物主愿意让一种类型的生物去取代另一类型的生物。但是在我看来，这仅是用庄重的语言重述了这一事实。相信生存斗争并遵循自然选择原则的人都会承认，每个生物都在不断努力增加其数量。任何一种生物，只要在习性上或在构造上发生微小的变化，便会比该地的其他生物更具优势，并会因此占领其他生物的位置，不管这一位置与它原来的位置有多么的不同。因此，对于以下事实，他们不会感到惊讶：长蹼足的高原鹅和有蹼足的军舰鸟，它们要么生活在干燥的陆地，要么很少接触水；长有长趾的秧鸡生活在草地上而不是沼泽中；某些啄木鸟生活在几乎没有树木的地方；鸫和膜翅目的一些昆虫可以潜水；海燕具有海雀的习性，等等。

极完美而复杂的器官

眼睛的构造之精巧，可谓无与伦比，它可以针对不同的距离来调节焦点，可以接纳强度不同的光线，并且可以校正球面和色彩的偏差。坦白地说，假设眼睛是通过自然选择而形成的，这样的说法似乎是极其荒谬的。有人曾宣称，太阳是静止的、地球围绕太阳转这一说法是错误的。因此，每个哲学家都熟知的“民声即天声”这样的谚语，在科学上却是不可信的。但是理性告诉我，假如可以证明，简单且不完善的眼睛到复杂且完善的眼睛之间，存在着无数等级，每个等级对动物都是有利的；如果可以进一步假设，眼睛的确会发生微小的变异，并且这种变异是可以遗传的；如果在变化的生存条件下，构造上的任何变异对动物都有利；那么，尽管用想象力难以克服，但是自然选择能够形成完美而复杂的眼睛这一观点一定是真实的。神经对光敏感的方式以及生命本身是如何起源的，这两个问题不在我们的研究范围之内。但我要指出，在一些最低等的生物体内虽然没有找到神经，但是它们确实可以感光的。我认为是某些感觉元素积聚在它们体内，进而具备了这种特殊感觉能力，这并非是不可能的。

在搜寻任何物种的器官不断完善过程中的中间类型时，我们应该专门研究其直系祖先；但这几乎是不可能的，并且我们不得不观察同类群中其他种或属的动物，即来自相同原始祖先的旁系后代，以便了解在完善过程中出现的不同级别，也许还会发现一些遗传下来的没有变化或者只有细微变化的级别。然而，不同纲内动物相同器官的状况，有时候也能说明该器官经历的演化步骤。

眼睛这个最简单的器官，由一根感官神经形成，只是被色素细胞围绕并为半透明皮肤遮盖，而且没有任何晶状体或其他折光体。但是根据乔丹的研究，我们可以发现更低级的视觉器官，它没有任何神经，只是一团色素细胞，附着聚集在肉胶质组织上，却可以起到视觉器官的作用。上述这样的眼睛，性质简单，只能辨别明暗，缺乏清晰的视觉能力。根据乔丹的叙述，某些海星包围神经的色素层上有小的凹陷，里面充满透明胶质，凸起来的表面有如高等动物的角膜，他认为这种结构不能成像，只是用来聚合光线，使它们更容易感光。光线的聚集是形成真

正能够成像的眼睛的第一步，也是最重要的一步。因为只要具有裸露的感光神经末梢（在低等动物中，有些埋于身体的深部，有些接近于表面），当它与聚光机构距离适当时，便会形成影像。

关节动物纲的视觉器官是最原始的单根感光神经，仅被色素细胞覆盖。这种色素细胞缺乏晶状体或其他光学装置，但有时会形成一种瞳孔。现在我们已经知道，有巨大复眼的昆虫，眼膜上的无数小眼形成了真正的晶状体，并且这种视锥体包含着奇妙变异的神经纤维。但是关节动物的视觉器官趋异很大，以致米勒将其分为三个大类和七个亚类，除此之外还包括第四大类聚生单眼。

假如我们回想一下前面简要介绍过的这些事实，也就是低等动物眼睛构造变化之多，差异之大和中间类型之繁多；如果我们还记得，已灭绝的生命形式比现存的数量大多了，那么就会相信，在自然选择的作用下，一根简单的被色素细胞包围和被透明膜覆盖的装置，很容易演变为任何一种关节动物具有的那样完备的视觉器官。

读者看完本书后便会发现，大量的事实只有用自然选择变异的学说才能得到完美的解释。我们应当毫不犹豫地进一步承认，哪怕像鹰的眼睛那样完美的构造，也只能是这样形成的，即使我们不清楚其演变的过程。有人曾反驳，要想改进眼睛，把它作为完美的器官保留下来，就必须同时产生许多变异，他们认为自然选择不可能做到这些。就像我在论家养动物变异的那本书中指出的，如果变异是极细微且逐步发生的，就没有必要假设它们都是同时发生的。正如华莱士先生谈到的，“假如焦距太短或太长，晶状体便可通过曲度或密度的改变而得到改进。假如曲度不规则，光线则不能聚于一点；想要得到改善，只要增加曲度的规则性就可以了。因此，对于视觉而言，虹膜的收缩和眼肌的运动并不是最重要的，在眼睛的演化过程中，它们只不过是在某一阶段进行了补充和完善而已。”在动物界最高级的脊椎动物中，它们的眼睛最开始是极其简单的，例如文昌鱼的眼睛，没有什么特别的装置，只不过由一个透明皮肤小囊和一根盖有色素的神经组成。在鱼类和爬行类中，就像欧文说的那样，“屈光构造的诸级变化范围很大。”根据微尔和的意见，人类美丽的晶状体是在胚胎期由表皮细胞集聚形成在囊状皮褶中的；而玻璃体是由胚胎的皮下组织形成的；这一点具有举足轻重的意义。尽管如此，要想

对如此奇异而并非绝对完美无缺的眼睛的形成得出公正的结论，就必须以理性战胜想象。但这对我来说是极其困难的，因此有人把自然选择的原理延伸到这样远时会犹豫不决，对此我也可以理解。

人们几乎不可避免将眼睛与望远镜相提并论。我们知道，望远镜是人类高智慧的结晶，通过长时间的研究已经将其完善了；我们很自然地推断出，眼睛是由某种相似的过程形成的。但是这种推论是否太过主观了呢？ 我们是否有权假定造物主是通过类似人类智慧的力量开展工作的呢？如果必须将眼睛与光学仪器进行比较，我们应该想象眼睛有一层厚的透明组织，间隙中充满着液体，下面有对光敏感的神经；然后，假设该层各个部分的密度不断发生变化，分离成了密度和厚度各不相同的厚层，各层之间的距离不同，表面的性状也在缓慢地变化着。此外，我们必须假设，总有一种力量即自然选择，随时关注着透明层中的每一个轻微的偶然变异，并仔细选择在不同条件下、以任何方式或任何程度产生的每一个与众不同的有利变异，然后保留下来。我们必须假设，这些被保留的新产生的状态呈百万倍地增加，直到产生更好的新状态后，旧的类型就会被消除。在现存的生物中，变异会引起一些微小的改变，繁殖会使它们的数量无限增大；而自然选择会准确无误地将每一个有利改进挑选出来。如果让这一过程持续数百万年，每年都作用于数以百万计的各种各样的个体，难道我们还不相信，这样形成的活的光学仪器不会优于玻璃仪器吗？就好像“造物主”的作品，难道不比人类的作品优秀吗？

过渡的方式

如果能够证明任何复杂的器官不可能是由大量的、连续的、微小的改进形成的，那么我的学说将完全崩溃，但我找不到这样的例子。毫无疑问，现存的器官可能存在许多我们不知道的过渡类型，尤其是当我们观察许多孤立的物种时，根据我的学说，它周围原有的许多过渡类型大都已经灭绝了。我们再用一个纲内所有动物共有的一个器官来做说明，因为后一种情况下，这个器官必然在一个非常遥远的时期形成，然后此纲内各种动物才发展起来。因此，想要发现该器官早期经过的各级过渡类型，就必须观察那些早已绝灭了的原始类型。

我们在得出结论，即认为不经过某种中间过渡类型就能形成器官

时，应该格外谨慎。在低等动物中，关于同一器官同时具备完全不同功能的例子非常多。例如，蜻蜓的幼虫和泥鳅的消化道同时具有呼吸、消化和排泄功能。水螅的身体内层可以翻向外面，用其外表面进行消化，而负责消化的内表面则进行呼吸。在这种情况下，自然选择可能会让原本具有两种功能的器官的全部或者一部分专门负责某一种功能，并且如果因此获得了任何益处，该器官的性质就会发生很大的改变。众所周知，许多植物常常会同时开出不同形态的花。如果仅能开出一种形态的花，那么该物种的花的形态就会突然发生大的改变。但是，同一株植物开出的两种花型，很可能是由许多微小的变化积累而成的。个别情形下，这些微小的变化还在继续发生改变。

有时，两个不同的器官在同一个体中会同时发挥相同的功能，这是极为重要的过渡方法。举个例子，鱼通过鳃来呼吸溶解于水里的空气，同时通过鳔呼吸处于游离状态的空气，而充满血管的膈膜将鳔分隔开，并且还有鳔管来提供空气。再比如，植物有三种攀缘方式，螺旋状的缠绕、用有感觉的卷须附着在支持物上以及形成气根。一般来说，一种植物只使用其中一种方式，但也有少数植物的个体具有两种或三种攀缘方式。在这种情况下，可以很容易地对两个器官之一进行改变和完善，以承担这一功能的全部工作。在改善的过程中，另一个器官会协助这个器官的工作，而负责协助的器官则可能改变了，去发挥别的用途，否则这个器官就会完全消失。

鱼鳔是一个很好的例子，因为它清楚地向我们展示了一个非常重要的事实，即原本为某个目的（即漂浮）而生出的器官可以转化为完全不同目的（即呼吸）的器官。鱼鳔的另外一个作用，是作为听觉器官的辅助器。所有的生理学家都承认，鱼鳔在结构和位置上与高级脊椎动物的肺是同源的，或者是非常相似的。因此，在我看来，鱼鳔实际上已经成了肺，即专营呼吸的器官。

由此我们可以推断，所有具有真肺的脊椎动物都是从原型动物一代代衍变而来的，而对这种原型我们却一无所知，它具有鳔这个漂浮器官。正如我从欧文教授对这些部分的有趣描述中推断出的那样，我们可以理解一个奇怪的事实，即我们吞咽的每一个食物和饮料颗粒都必须经过气管上的孔，尽管有掉入肺部的风险，但是那里长有一个奇妙装置，

能够让声门紧闭。在较高等的脊椎动物中，鳃已完全消失，颈旁的裂隙及弧形的动脉仍然在胚胎中标志着鳃原来的位置。但是可以想象的是，现在已经完全消失的鳃可能通过自然选择逐渐用于某些特定目的。就像兰度伊斯曾经说过的，昆虫的翅膀是由鳃气管进化而来的。因此很可能，在这一大纲里，曾经的呼吸器官现已转变为飞行器官了。

在考虑器官的转换时，牢记从一种功能转换为另一种功能的可能性非常重要，因此我要再举一个例子。有柄蔓足类具有两块很小的皮褶，我称其为“保卵系带”。它通过分泌一种黏液将卵粘在袋中，直到卵在袋中孵化为止。这些蔓足动物没有鳃，但它们整个身体和卵袋的表面以及系带都具有呼吸的功能。藤壶科即无柄蔓足类则不同，它们没有保卵系带，在密闭的壳中，卵散落在袋的底部。但在相当于保卵系带的位置却长有一张膜，宽大且多皱褶，它和系带、身体的循环小孔自由相通，所以博物学家认为它具有类似鳃的功能。现在，我认为没有人会争辩这一科里的保卵系带与别的科里的鳃在严格意义上是同源的；实际上，它们之间是逐步转变的。因此，我毫不怀疑，原本用作保卵系带，同时也有轻微地帮助呼吸作用的这两块小皮褶，通过自然选择，促使它们的体积增大、黏液腺消失，逐渐转变为鳃了。假如所有有柄蔓足类都已经灭绝，而有柄蔓足类比无柄蔓足类更容易灭绝，谁能想到无柄蔓足类的鳃最初的作用是防备卵被冲挤出袋子外的呢？

最近美国的科普教授和另外一些人提出另一种可能的过渡方式，即通过生殖期的提前或推迟来实现。正如我们知道的，有些动物在其特征没有完全发育成熟之前的极早时期就能生殖了。如果一个物种的生育能力过早发展完全，那么该物种发育的成年阶段可能迟早会消失。在某些情形中，特别是幼体和成体的形态差别很大时，该物种的特征便会显著地改变或退化。而且，许多动物的性状在成熟之后，几乎在其余生还会不断地改变。例如哺乳动物颅骨的形状会随着年龄递增而发生很大的变化。穆利博士曾就海豹举出了若干与之相关的显著例子。众所周知，鹿越老，鹿角的分支数就越多。一些鸟类随着年龄的增加，羽毛的颜色会变得更加美丽。科普教授曾说过，某些蜥蜴的牙齿形状，随着年龄的增长也会发生很大的变化。根据米勒的记载，甲壳类动物成熟以后，不止有许多微小的部分会发生变化，甚至一些重要的部分也会呈现出新的特

征。除了上述例子，我还可以举出更多例子，如果生殖年龄延迟了，那么该物种的特征，尤其是成年期的特征，就会发生变异。在有些情况下，发育前期和早期阶段很快结束而至最终消失，也并非是不可能的。我还不能确定，物种是否常常通过或曾经通过这种比较突然的过渡方式而改进。但是，如果这种情况曾经出现过，那么幼体与成体间以及成体与老年体之间的差异，最初很可能是逐步获得的。

自然选择学说的特殊难点

尽管我们在得出任何器官不可能由连续且渐变的过渡产生的结论时必须极其谨慎，但是毫无疑问，还是会出现难题。

最严重的难题之一就是中性昆虫，它们的构造通常与正常雄性或可育雌性完全不同； 但是这种情况将在下一章中讨论。鱼类的发电器官又带来了另一个难题；无法想象这些奇妙的器官是通过什么步骤产生的；这也并不奇怪，因为我们甚至对它们还有什么功能都不是很清楚。毫无疑问，电鳗和电鳐的发电器官是有力的防卫工具，同时也能用于捕食。然而，据马泰西观察，鳐鱼的尾部也有类似的器官，即使其被激怒了，产生的电也很少，这点电甚至无法起到任何防卫和捕食的作用。麦克唐纳博士曾经研究过，鳐鱼的头部附近还有一个不发电的器官，但它似乎与电鳐的发电器官是真正同源的器官。其内部构造、神经分布以及对各种刺激的反应方式与普通肌肉非常相似。还有一点需要特别重视的是，肌肉收缩会伴随一个放电的过程。拉德克利夫博士认为“电鳐的发电器官在静止时会发电，似乎与肌肉和神经在静止时会充电的情形非常类似。电鳐的放电并没有什么特殊之处，可能也只是肌肉和神经活动时的一种放电形式而已。”我们现在不可能有除此之外的第二个解释。但是由于现在我们对这些器官的功能知之甚少，而且对这些发电鱼类的始祖的习性和构造也不是很清楚，因此在这种情况下，认为这些器官不可能经过有利的过渡类型而逐渐形成，未免也太大胆了。

最初我们认为，这些发电器官给我们带来另一个更加严重的难题，因为它们仅出现在十二种鱼中，其中好几种鱼的亲缘关系非常遥远。通常，当同样的器官出现在同一纲且生活习性不相同的生物中，人们会认为它们是由同一祖先繁衍而来的。而这些器官缺失的成员，则被认为是

由于长期不使用或自然选择的作用而丧失了。因此，如果这些发电器官是从某一原始祖先遗传而来，我们可能会认为，所有的发电鱼类之间都有一定的亲缘关系。然而事实并非如此，地质学上根本没有任何证据会使我们相信以前大多数鱼类有发电器官，而大部分变异后代都已丧失了这类器官。当我们对这一问题进行更详细的考察时便会发现，具有发电器官的鱼类，发电器官的部位和构造都不相同，就好似电板方式不一的排列组合一样，而且据佩西尼所说，这些发电器官的发电过程和方法也各不相同。还有最重要的一点，就是这些发电器官的神经来源也不一样。因此，我们不能认定，这些鱼类的发电器官是同源的，而只能说它们具有相同的功能。我们也没有理由认为它们是由一个共同祖先繁衍下来的。因为拥有一个共同祖先，意味着它们在各方面都应当极其相似。于是，对于那些表面上相同，实际上起源于若干亲缘关系很远的物种的器官，这一难题便被解决了。但是一个次要却仍然极难的问题却凸显出来了，那就是这些器官是怎样在这些不同类群的鱼中逐渐形成的呢？

有几种昆虫，分属亲缘相距甚远的不同科，它们的发光器官所处部位不同，对此我们不甚了解，这几乎提出了一个和鱼类发电器官差不多的难题。但是还有另外一种情况，例如，植物有一种奇妙装置，会使花粉团着生在具有黏液腺的足柄上，它们在红门兰属与马利筋属中的构造是一样的。但是，这两属的亲缘关系在显花植物中相距最远，这种类似的构造并不同源。有些生物在所有分类中地位相距甚远，但是具有特殊而类似的器官，即使这些器官的外观和功能相同，我们也可以发现它们之间的根本差别。例如，头足类或乌贼与脊椎动物的眼睛极其相似，但是我们不能因此认为在系统发育上相距如此远的两类动物，相似的部分遗传自一个共同的祖先。尽管米瓦特先生曾提出，这种情况也是一个特殊难点，但我并没有看出有多么困难。任何视觉器官必须由透明的组织形成，并且含有某种晶状体，这样才可以把影像投射到暗室的后方。乌贼和脊椎动物的眼睛除了外表上的相似，再没有任何真正相同之处。只要看过亨森先生关于头足类眼睛的研究报告，我们就可以清楚这一点了。我在这里不做详细说明，仅指出几点不一样的地方。较高等乌贼的晶状体由两部分组成，两者的构造和位置都与脊椎动物的完全不同，而是像一前一后的两个透镜。其视网膜的主要部分实际上是颠倒的，这一点也与脊椎动物完全不同，而且还有一个大的神经节在其眼膜内，肌肉

间以及其他部分之间的一些特点也有很大的区别。所以描述乌贼与脊椎动物的眼睛构造是非常困难的，因为我们很难确定应该将同一术语应用到怎样的程度。当然，人人都可以否定，这两例中的眼睛是自然选择对连续的微小变异发生作用而逐渐形成的说法。但是，假如承认了一种眼睛是自然选择作用形成的，那么就可以清楚地认定另一种眼睛也可能如此。按此观点，我们就可以预测，这两大类动物的视觉器官会在结构上有根本差别。在上述例子中，自然选择通过保存每一生物的有利变异在工作着，所以也可以在不同的生物中产生功能类似的器官，而这些相同的构造并不是由共同祖先遗传来的，这就好比有两个人同时研究出了同样的发明一样。

米勒为了证实这一观点，非常谨慎地给出了大致相同的论据。甲壳纲几个科中的少数物种具有一种呼吸空气的器官，适于水外生活。米勒对其中两个科进行了特别详细的研究。这两科有很近的亲缘关系，各物种的所有重要特征都非常一致。例如它们的感觉器官、循环系统、复杂的胃中毛丛的位置以及营水呼吸的鳃的全部构造，甚至清洁鳃的微小的钩都几乎完全一致。由此我们可以预料到，这两个科中的少数在陆地上生活的物种，其同等重要的呼吸空气器官应当也是相同的。因为，既然别的重要器官都非常相同或完全一致，为什么具有同样功能的呼吸器官的构造会不一样呢？

根据我的观点，米勒认为这么多构造上的相似之处肯定是由共同的祖先遗传下来的。然而，米勒研究的这两科中大多数物种与大多数甲壳动物一样，都是水栖动物，所以它们共同的祖先不可能适于呼吸空气。于是，米勒仔细检查了呼吸空气的两个物种的呼吸器官，发现在某些重要方面，例如呼吸孔的位置、开闭的方式以及其他一些附属构造，都有差异。假设属于不同科的动物可以各自逐渐适应水外呼吸空气的方式，那么我们就可以理解这些差异，甚至可以预测。由于变异的性质决定于生物本身和所处环境两种因素，因而这些属于不同科的物种必然会有某种程度上的差异，那么它们的变异也不会完全相同。这样一来，如果要通过自然选择获得相同的功能，就必须在不同的变异材料上进行工作，由此产生的构造也必然会有差异。假如物种是分别被创造出来的，那这些事实就都无法被理解了。这样的论证过程使米勒在很大程度上同意了

我在此书中的观点。

已故的克拉帕雷德教授是一位优秀的动物学家，他曾用同样的方式推论出了相同的结果。他指出，隶属于不同亚科和科的寄生螨都长着毛钩。这些毛钩不可能是由一个共同的祖先遗传而来的，它们必定是各自进化而来的；在不同类群中，它们的起源也各不相同，有些来自前腿，有些来自后腿，另一些由下颚或唇变化而来，还有一些由身体后部下方的附肢变化形成。

由前面的事例我们可以发现，完全没有亲缘关系或亲缘关系甚远的生物，也会有外观非常相似的器官，虽然起源不同，但是这些器官达到的目的和所起的功用却是一样的。另一方面，即使是密切相近的生物，通过多种方式也可以达到相同目的，这是贯穿整个自然界的共同规律。鸟的羽翼和蝙蝠的膜翼，在构造上是如此的不同；蝴蝶的四翅、蝇类的双翅及甲虫的鞘翅在构造上的差别就更大了。双壳类的壳能开能合，但从胡桃蛤的一长行交错的齿到贻贝的简单的韧带，铰合的结构形式有诸多不同。植物的种子构造精巧，传播方式因其性状与构造相异而不同，有的是荚转变成较轻的气球状被膜来传播；有的种子藏于不同部分形成的果肉中，营养丰富且色泽鲜艳，以此吸引动物吞食来传播；有的长有钩状物、锚状物或锯齿状的芒，可以附着于走兽的毛皮上；还有些长着形状各异且构造精巧的翅和毛，可以借助微风四处飘扬。以多种方式达到相同的结果，这个问题我们确实应该特别注意。对此，我还要举出另外一个例子。有些学者认为，各种生物以不同的方式形成，就好像商店里的玩具一样，仅仅是为了展示不同的花色样式，但是这种自然观念并不可信。雌雄异株的植物，甚至雌雄同株的植物，花粉不能自然地散落在柱头上，需要借助某种外力完成授精作用。有些植物的授精方式是这样的，花粉粒轻而松散，可以随风飘荡，单纯靠机遇落在雌蕊的柱头上，这是可以想象到的最简单的方法。有另外一种同样简单但却极不相同的方法，许多植物都是如此，它们的对称花会分泌一些花蜜，以吸引昆虫来访，昆虫就会把花粉带到柱头上去。

从这简单的方面入手，我们便会发现，为了同一目的，不同植物用基本相同的方式产生了无数装置，导致花的每一部分发生了变化。花蜜可以被储存在各种形状的花托内，雌蕊和雄蕊的形态可以有很多变化，

有时形成陷阱似的形状，有时会由于刺激或弹性而进行巧妙的适应运动。最近，克鲁格博士描述了盔兰属的异常情况，也可以用此种构造来解释。这种兰花的唇瓣上方有两个角状构造，可以分泌几乎纯净的水滴，滴入唇瓣下方一个向内凹陷的水桶状构造中；当桶内的水半满时，水就会从一边的出口溢出。水桶上方是唇瓣的基部，此处也有一个凹陷的小窝，两侧有出入口，小窝内有奇特的肉质稜。一个人即使再聪明，如果他没有亲眼见过那种情形，也永远无法想象这些构造有什么作用。克鲁格博士曾看到成群结队的大土蜂造访这巨大的兰花；但它们不是为了采蜜，而是为了食用小窝内的肉质稜；因此经常因为相互碰撞而跌进水桶里，翅膀被水浸湿，不能够飞起来，只能从那个出水口或水溢出的孔道爬出去。克鲁格博士曾经见到许多土蜂在不情愿地洗过澡后排着队爬了出去。孔道上面盖着雌雄合蕊的柱状体，很狭小，所以土蜂想要爬出去就很费力，首先它的背便会擦着胶黏的雌蕊柱头，接着又会遇到花粉块的黏液腺。这样，当土蜂爬过刚开放的花的孔道时，便会把花粉块粘在它的背上带走了。克鲁格给我寄来一朵浸泡在酒精里的花和一只土蜂，土蜂是在还未爬出孔道时弄死的，花粉块还粘在它的背上。当粘着花粉的土蜂再次飞到这朵花上，或者飞到另一朵花上时，被它的同伴挤进了水桶里，在通过孔道爬出时，背上的花粉块首先便会与胶黏的柱头接触，并粘在上面，于是花就受精了。现在我们终于看到了此花每一部分构造的充分作用，例如分泌水的角状体、盛着水的桶，它们的作用都是为了防止土蜂飞走，让土蜂不得不从孔道爬出，从而擦着生在适当位置的黏性花粉块和黏性柱头，帮助花朵受精。

还有一种很奇妙的兰花，属于近缘的龙须兰属，其花的构造非常不同，但作用却是相同的。就像光顾盔兰属的花一样，蜂的来访是为了食用花瓣的；当它们这样做的时候，就不免与细长的尖尖的突出物接触，该突出物感觉灵敏，我称之为触角。触角一被碰到，就会把感觉即振动传到一种膜上，该膜便立刻会破裂，由此释放出一种弹力，使黏性花粉块如箭一样地射出，胶黏的一端就正好粘在蜂背上。这种兰花是雌雄异株的，这样雄株的花粉块会被带到雌株的花上，在那里碰到柱头，柱头的粘力能够撕裂弹性丝，从而使花粉留下并进行受精。

可能有人会问，通过上述及其他无数事例，我们如何弄清楚这种为

了达到同样目的而出现的复杂分级步骤和各式各样的方法呢？这一问题的答案无疑就是我们前面讲过的：　当两个类型彼此之间已经有细微差异，如果发生变异，它们的变异性质也不会完全相同，因此为了同一目的通过自然选择得到的结果也不会相同。我们还应记住，任何高度发达的生物一定经历过诸多变化；而且每种构造的变化都有被遗传下来的趋势，任何变异都不会轻易地丧失，只会一次比一次进步。因此，任何物种的所有构造，无论其目的是什么，都是众多遗传变异的总和，是物种在不断适应变化的生活习性和生存条件中获得的。

在许多情况下，很难通过器官可能发生的转变来推测其当前状态；但是，考虑到现存的和已知的类型，比起已灭亡的或未知的类型，数量要少很多。令我惊讶的是，很少有人能指出某个器官是未经过渡阶段而形成的。好像在任何生物中，为了特殊目的而创造的新器官，很少或从未出现过。实际情况确实如此，就像自然史里的那句格言：“自然界里没有飞跃”，尽管这句格言久远且略显夸张。几乎每位经验丰富的博物学家都在著作中承认这一点；正如米尔恩·爱德华兹所说，自然界虽然富于变化，但却很少革新。假如生物是分别独立被创造出来的观点是对的，那该如何解释，为什么变异如此之多，而真正的创新却又如此之少呢？既然众多独立生物是分别创造出来的，并让它们适应自然界特定的位置，那么为什么它们的所有器官都普遍地被众多逐渐分级的步骤联系在一起呢？在从一种构造变成另一种构造时，自然界为什么不采取突然的飞跃呢？按照自然选择的学说，我们就很容易理解自然界为什么会如此，因为自然选择只能通过细微而连续的变异发生作用，它从来不突然采取大的飞跃，而是以小而稳的步伐缓缓前进。

自然选择对次要器官的影响

由于自然选择是通过生存与死亡，即让适者生存、不适者淘汰来实现的，这就使我很难理解次要器官的起源或形成；有时候，其难度就像理解最完美和最复杂的器官的起源一样，虽然这两种问题的难度截然不同。

首先，对于任何生物的整个构造，我们知之甚少，很难说哪些轻微变异是重要的，哪些是不重要的。在上一章中，我给出了大量次要性状

的实例，例如水果的绒毛、果肉的颜色、兽类皮毛的颜色，这些性状与昆虫的侵害或者体质差异有关，可以肯定会受到自然选择的作用。长颈鹿的尾巴看起来像是人工制作的苍蝇拍；难以置信的是，它是通过连续不断的细微变异而越来越好，最后实现驱蝇这样的小功能。但是即使在这种情况下，做出肯定回答之前也要深思熟虑。因为我们知道，南美的牛和其他动物的分布和生存绝对取决于它们抵御昆虫侵害的能力。这样，无论用什么方法，只要可以抵御这些敌人的个体，就可以进入新的牧区，从而获得巨大的优势。并不是说大型的四足动物实际上会被蝇类摧毁（在极少数情况下除外），而是蝇类通过不断地对它们进行骚扰来削弱其体质，以使它们更容易患病，或者在即将来临的饥荒中，无法顺利地寻找食物或摆脱猛兽的攻击。

如今，在某些情况下，具有微不足道重要性的器官可能对早期祖先至关重要，并且在早先一个阶段逐渐完善之后，尽管现在已很少使用，但仍然以几乎相同的状态遗传下去；并且，它们现今构造上任何有害的偏差，都要受到自然选择的抑制。看到尾巴在大多数水生动物中具有何等重要的作用，便可以解释为何尾巴在许多陆地动物中普遍存在，而且用途很广；它们的肺部或改良的鳔，证明了它们是水生起源的。一种在水生动物中形成的发达的尾巴，随后可能会被用于各种目的，比如用作蝇拂，用作执握器官，或者如狗尾巴那样帮助转弯；但野兔在转身时，尾巴的帮助很小，因为几乎没有尾巴的野兔也能很快地转身。

其次，有时我们容易错误判断某些性状的重要性，并错误地认为这些性状是经自然选择形成的。我们应该记住：生存条件的改变会引起明显的效果；所谓自发变异的效果似乎与环境条件的关系很小；重新恢复消失已久的性状倾向产生的效果；相关作用、补偿作用、一部分压迫另一部分等复杂生长规律产生的效果；最后，经过性别选择，它们能够或多或少地将这一有利性状传播给另一性别，尽管这些性状的改变对另一性别来说没有丝毫作用。这样间接获得的构造，它最初可能对物种没有好处，在新的生存条件下和新获得的习性，以后却可能被该物种的后代利用。

如果仅存在绿色啄木鸟，并且我们不知道有很多黑色和杂色的啄木鸟，我敢说我们会以为绿色是一种美妙的适应方法，可以使频繁出没于

林间的鸟藏于绿荫中而躲避敌害；因此，我们会认为这是一个重要的特征，可能是通过自然选择获得的；实际上，我毫不怀疑颜色主要是由于性别选择获得的。有一种藤棕榈生长在马来群岛上，枝尖丛生着构造精妙的刺钩，因此它可以借此爬上最高的树木，这一点无疑为该植物提供了巨大的用途。从非洲和南美洲生刺物种的分布情况来看，我们在许多非攀缘植物的树上也看到了几乎相似的刺钩，因此可以相信这些刺钩是用来防御草食兽的。藤棕榈的刺钩最初可能也是如此，后来又经过进一步变异并成为攀缘植物时，刺钩就被改良和利用了。兀鹫头上的秃皮，通常被认为是为了适应取食腐尸；这可能是对的，但也可能是由于腐败物质的直接作用。但是，我们可以看到干净饲养的雄性火鸡头上的皮肤同样裸露。我们做出任何此类推断时，都应该非常谨慎。幼小哺乳动物头骨上的裂缝被认为是可作为辅助分娩的一种完美方法，毫无疑问，这能促进生产，或许对生产必不可少。然而，裂缝也出现在幼小的鸟类和爬行类的头骨中，而且它们需从破裂的蛋壳里爬出来，由此我们可以推断出，这种构造最初产生于生长法则，然后被高等动物在分娩时利用。

我们根本不了解产生微小变异和个体差异的原因；通过思考不同国家——尤其是文明程度较低的国家（那里几乎没有人工选择）之间，家养动物品种间的差异，我们会立即理解这一点。各地未开化人所养的动物，在一定程度上受自然选择作用更多，因为通常它们都必须为自身的生存而斗争，在不同气候下，那些构造上稍有不同的个体更容易获得成功。牛对于蝇类的侵害非常敏感，就像对被植物毒害一样，敏感性与体色有关，甚至颜色也是自然选择的结果。细心的观察者坚信潮湿的气候会影响毛发的生长，并且角与毛发有关。山区品种总是与低地品种不同；在山区由于使用后肢较多，可能对后肢影响更大，甚至连骨盆的形状也会受到影响；然后根据同源变异法则，前肢甚至头部都可能会受到影响。骨盆的形状也可能影响子宫受到的压力，进而影响胎儿部分的形状。我们有理由相信，在高海拔地区费力地呼吸会增加胸部的大小；然后相关性将再次发挥作用。猪的品种发生巨大变异的一个重要原因是，食物丰盛且运动较少，那修西亚斯最近在他优秀的论文中提到过这一点。但是我们对于一些已知的和未知的变异原因了解得太少了，因此无法推测其相对重要性。我在这里只想表明，尽管通常都认为家养品种是由一个或几个亲种经过许多世代才出现的，但是假如我们不能清楚解释

它们性状差异的原因，那么真正物种间产生微小相似差异的真实原因，就不必看得太严重了。

功利说有多少真实性：美是怎样获得的

前面的言论，使我想再针对一些自然主义者最近提出的反对功利说说几句，功利说主张构造的每一个细节都是为拥有者的利益而产生的。他们认为，已经创造的许多构造都是为了给人类或者造物主带来美感（造物主不在科学讨论范围之内），或者仅仅是为了更多的花样。如果这个说法是真的，对我的学说绝对是致命的。但是我完全承认，许多构造对个体没有直接的用途，并且对它们的祖先可能也没有任何用处，但这并不能证明它们是为了美观或新花样而创造出来的。毫无疑问，前面列举的各种变异的原因，确实改变了外部条件的明显作用，不管能不能因此获得利益，都可以产生效果，甚至是巨大的效果。但是到目前为止，更重要的是，要考虑到每个个体的主要部分都来自遗传。因此，虽然每一生物确实能适应它们在自然界的位置，但有许多构造现在已经与生活习性没有密切的关系了。因此，我们几乎无法相信，高原鹅和军舰鸟的蹼足对于它们有什么特殊的用途；我们也无法相信，猴子的手臂、马的前腿、蝙蝠的翅膀和海豹的鳍足中的相似骨骼构造，对于这些动物有特殊用处。我们完全有把握将这些构造归因于遗传。但是毫无疑问的是，正如对于大多数现生的水禽一样，蹼足对高原鹅和军舰鸟的祖先十分有用。因此，我们可以相信海豹的祖先不是鳍足，而是一只脚，脚上有五个脚趾，可以行走或抓握；我们可能会进一步相信，猴子、马和蝙蝠的四肢骨骼，最初可能是根据功利性由该全纲的某种古代鱼型祖先鳍内的众多骨头减少而形成的。对于引起以上变化的原因，如外界条件的一定作用、所谓自发的变异以及复杂的生长法则等，究竟应当占多大的比例，几乎是无法确定的。但是除了这些重要的例子之外，我们还可以推论，无论是现在还是过去，每一生物的构造对其所有者而言，总有某种直接或间接的用途。

至于说生物是因为人类的喜好才被创造得美丽，这一观念曾被宣告可以颠覆我的全部学说。首先我要指出，美的感觉很明显取决于主观感受，而与被欣赏对象的实质无关；而且审美观念也不是与生俱来或一成

不变的。例如，不同种族的男人对女人的审美标准就迥然不同。假如是为了供人类欣赏才创造出了美的生物，那么在地球上，人类出现之前的生物就不会如人类出现后那么美丽。产生于始新世的美丽的螺旋形和圆锥形贝壳，以及第二纪形成的有精致刻纹的鹦鹉螺化石，难道是为了人类在多年之后能够在室内鉴赏它们而提前被创造的吗？几乎没有什么可以比得上硅藻的微小硅质壳的美丽，难道它们被创造出来也是为了让人类在高倍显微镜下观察和欣赏的吗？其实硅藻以及别的不少生物的美，显然是因为对称生长的缘故。花是自然界最美丽的产物，之所以容易被昆虫发现，是因为绿叶的衬托让花显得鲜艳美丽。我从一个不变的规律得出结论，风媒花从来就没有华丽的花冠。有些植物通常会开两种花，一种是开放且颜色更艳丽的，以吸引昆虫；另一种是闭合且没有鲜艳色彩的，也没有花蜜，因而昆虫从来都不来访。因此我们可以得出结论，如果地球上没有昆虫的发展，植物就不会开出美丽的花朵，例如我们在枞树、栎树、胡桃树、榛树、茅草、菠菜、酸模、荨麻等植物上看到的一样，它们全都借助风力来授精。在果实方面也一样：草莓或樱桃成熟之后，既悦目又可口，卫矛的果实和枸骨叶冬青树的浆果都很美丽，没有人可以否认这一点。但是这种美只是为了吸引鸟兽吞食，以便使成熟的种子随粪便排出后得以散播。任何被果实包裹的种子（即生在肉质的柔软的瓤囊内），如果果实具有鲜艳的色彩或夺目的黑白色，就会用这样的方式散布，因此我推论出了这样的规律，并且不曾发现过例外。

另外，我要承认大多数雄性动物都是为了美观而变漂亮的，例如一切漂亮的鸟类、鱼类、爬行类及哺乳类，以及各种色彩艳丽的蝴蝶等；但这并不是为了取悦人类，而是通过性选择获得的，因为更漂亮的雄性个体会不断被雌性选中。鸟类的鸣叫声也是如此。由此我们可以推论：大多数动物都偏好美丽的色彩和悦耳的鸣叫声。在鸟类和蝴蝶中，常有雌性和雄性长得一样美丽，这显然是性选择的结果，因为获得的色彩会遗传给两性而不只是雄性。从某种色彩、声音或形状获得的特殊快感，即最简单形式的美感，最初是怎样在人类及低等动物的心中出现的呢？这确实是一个难题。还有一个难题是，为什么某些香气和味道可以给予快感，而其他的却会引起不悦呢？在所有类似的情形中，习惯似乎在一定程度上发挥着作用；但必然还有某种基本原因，是存在于每个物种的神经系统构造中的。

自然选择不可能仅出于一个物种的利益而使另外一个物种发生变异；尽管在整个自然界中，一个物种不断地利用另一个物种的结构并从中获利。但是，自然选择可以而且确实会产生直接伤害其他物种的构造，正如我们看到的蝮蛇的毒牙以及姬蜂的产卵管，姬蜂通过它能把卵产在别的种活昆虫的体内。如果可以证明任何一个物种构造的任何部分是专门为了另一个物种而形成的，那将摧毁我的理论，因为这不可能是通过自然选择产生的。尽管在自然历史著作中可能会发现许多这样的陈述，但我觉得没有一个是有意义的。众所周知，响尾蛇有一个毒牙可以用作防御和捕猎，但是一些作者认为，它的响器同时也有不利的一面，即会使它的猎物产生警惕而逃脱。我很难相信，猫准备捕鼠准备越跃时尾巴的蜷曲摆动，是为了使命运已经被决定的老鼠警戒起来。更令人信服的观点是：响尾蛇用它的响器、眼镜蛇颈部的膨胀、蝮蛇在发出很响而粗糙的咝咝声时让身体膨胀，都是为了将那些对于最毒的蛇也会发起攻击的鸟兽吓走。当狗接近小鸡时，母鸡会竖起羽毛、张开两翼，也是相同的原理。动物吓跑敌人的方法很多，但因为篇幅有限，不再多做讨论。

自然选择永远不会产生对任何生物害大于利的构造，因为自然选择的行为完全是出于各生物的利益。正如佩利所言：没有一种器官的形成是以给生物本身带来痛苦或损害为目的的。如果对每个部分造成的利与害进行公正的评价，我们就会发现，每个部分都是有利的。经过一段时间后，在生存条件变化的情况下，如果任何部分变为有害，这部分就会发生改变；否则，该生物将灭绝，就像无数已经灭绝的物种一样。

自然选择只会使每一种生物与生存在同一个地区的、和它竞争的其他生物一样完善，或比其稍微完善。我们可以看到这是自然界中达到完美的标准。例如，新西兰本地的生物相比较起来都是完善的，但大批欧洲动植物被引进后，它们迅速地被征服了。自然选择不会产生绝对的完善，就我们能判断的，我们也永远不会在自然界看到这种高标准。据米勒说，即使最完美的器官，比如人类的眼睛，也不能完全校正光线收差。没有人会反对赫姆霍兹的判断，他认为人眼拥有奇异的能力，并用最有力的词语进行了描述，又说了以下重要的话：“在这种光学结构和视网膜的影像里，我们也发现不精确和不完善情况的存在；但不能把这种

情况与我们刚才遇到的感觉领域内的各种不协调相比较。我们可以说，自然界倾向于积累矛盾，那是为了要否定内外界之间已存在的和谐的基础。”如果理性使我们热衷于欣赏自然界中许多独特的创造，那么理性也会提醒我们，还有其他一些不完善的构造存在，尽管我们在这两方面都容易犯错。蜜蜂的尾刺上倒生了小锯齿，如果蜜蜂用尾刺蜇了敌人之后再拔出来，就连自己的内脏也会被拉出来，从而导致自身死亡。我们能够认为这样的结构是完善的吗？

如果我们假设蜜蜂的尾刺最初像锯齿状的钻孔工具存在于一个遥远的祖先中，像该大目中的许多蜂类一样，后来发生了变异以适应现在的功能，但还不够完善。它的毒素是以后才变剧烈的，最初可能只是用于产生树瘿。这样一来，我们也许可以理解，为什么用尾刺蜇敌人会导致蜜蜂的死亡。因为总的来说，如果尾刺的力量对蜜蜂社群有用，它将满足自然选择的所有要求，尽管这可能会导致一些成员死亡。如果我们钦佩雄虫凭着嗅觉寻觅雌虫的神奇能力，那么我们是否也要钦佩对社群没有任何作用的雄蜂呢？它们仅为繁衍目的而产生，最后被勤劳而不育的姊妹工蜂屠杀。也许这很困难，但我们应该佩服蜂王野蛮而本能的仇恨，这促使她立即消灭刚出生的女儿们，如果不这样，它可能就会在生存斗争中灭亡。毫无疑问，这是为了整个社群的利益，不论是爱还是恨，对于自然选择的无情原则来说都是一样的，尽管后者十分少见。如果我们钦佩兰科和其他许多植物的巧妙构造，考验通过昆虫来授粉，那么枞树产生大量密云似的花粉，只有少数几粒可以碰巧顺风飘落在胚珠上，我们能不能认为它也是完善的呢？

摘要：自然选择学说包含的模式统一法则与生存条件法则

在本章里，我们讨论了可以用来反对我的学说的一些难点和异议，其中许多是很严重的。但是我认为在讨论中已经提出了一些事实，依据独立创造的理论，这些事实完全是无法解释清楚的。我们已经看到，在任何一个时期，物种都不是可以无限变异的，也没有通过多个中间类型联系在一起。部分原因是自然选择的过程总是非常缓慢，并且在任何时候都只会对少数类型起作用；部分原因是自然选择的过程就几乎意味着

先前和中间类型的不断被替代和灭绝。现在生活在一个连续区域中的近缘物种，通常是在这一区域还没有连接起来，以及生存条件彼此不同时形成的。当在一个连续区域中的两个地区形成了两个变种时，通常会形成一个适合中间地带的中间变种。但是根据前面的论点，中间变种的数量通常少于其连接的两种类型；因此，在进一步变异的过程中，后两者在数量上大于前者，因此更具优势，便会把中间类型排斥和消灭掉。

在本章中，我们已经看到，在做出极不相同的生活习性不可能彼此转化的结论时，我们应该多么谨慎。例如，蝙蝠不是通过自然选择而形成的，其最初只是能在空中滑行的一种动物。

我们已经知道，一个物种可能在新的生存条件下改变其习性，或具有多样化的习性，其中某些习性与它最接近的种类的习性非常不同。因此，我们应该牢记，每个生物都试图适应任何可以居住的地方，这样我们就能理解，为什么高原鹅脚上有蹼，啄木鸟会有陆栖的，有些鸫会潜水，以及有些海燕具有海雀的习性。

如果说通过自然选择就可以形成像眼睛那样完美的器官，这会让所有人犹疑；但是对于任何器官而言，如果我们知道一系列逐渐复杂的过渡类型，每个类型对该生物都是有利的，那么在生存条件变化的情况下，通过自然获得任何可想象的完美程度，这在逻辑上也不是不可能的。在我们不知道中间状态或过渡状态的情况下，若要断定不可能存在中间状态，我们必须非常谨慎，因为许多器官的变态至少证明了功能上奇妙的改变是可能的。例如用于漂浮的鳔已经转变成具有呼吸功能的肺了。同一器官同时执行两种不同的功能，以及不同器官同时执行同一功能，都会加速器官的过渡，前者会部分或全部地转化为执行一种功能，而后两个器官，一个会在另一个的帮助下不断完善。

在自然系统中，我们也能看到，亲缘关系很遥远的两种生物，可能会分别独立产生执行同样功能且外表十分相似的器官；当我们仔细观察这类器官时，通常会发现其构造上本质的不同，按照自然选择的原理也应该如此。另一方面，依据自然选择的原理，构造的多样性是为了达到同一结果，这是整个自然界的普遍规律。

在几乎每种情况下，我们知道的都太少了，所以我们会错误地认

为：生物的某一部分或某个器官对物种的生存极不重要，以至于不能通过自然选择缓慢地积累其结构上的变异。在其他很多情况下，变异法则或生长法则可能会直接导致变异的产生，起初对该物种毫无利益。但是我们有把握相信，在新的生存条件下，该构造会被利用在物种的利益上，而且还会进一步变异下去。我们也可以相信，以前具有重要意义的部分通常会被保留下来，尽管它已经变得不那么重要，以至于在目前的状态下，它无法通过自然选择而获得，例如，水栖动物的陆栖后代依然保留了尾巴。

自然选择不会在一个物种中产生任何构造，只是为了另一个物种的利益或者只是为了伤害另一个物种；尽管它很可能会产生对其他物种非常有用甚至必不可少的，或对其他物种极其有害的部分、器官和分泌物，但在任何情况下，该构造对所有者都是有用的。在每个有众多物种生存的地方，自然选择都必须通过当地生物之间的生存斗争来发生作用，因此，只有按照当地特有的标准，才能在生存斗争中取得成功。正如我们看到的那样，一个较小地区的生物通常会屈服于另一个较大地区的生物。因为在一个更大的地区，将有更多的个体生存，也有更多样化的形式，并且竞争将更激烈，完善的程度也更高。自然选择不一定会产生绝对的完美，根据我们有限的认知也无法判断什么是绝对的完美，也不是随处都可以判定的。

根据自然选择学说，我们可以清楚地理解自然历史中“自然界没有飞跃”这一古代格言的完整含义。如果仅观察世界上现有的生物，这个格言严格看来并不正确，但是如果包括过去所有的生物，无论是已知的还是未知的，那么在自然选择学说的前提下，这个格言必定是正确的。

人们普遍认为，所有生物都是按照两大规律形成的，即体形一致和生存条件。体形一致是指同一纲的不同生物，构造上基本一致，并且与它们的生活习性完全无关。根据我的学说，体形一致可以从其后裔来解释。自然选择原则完全包含了著名的居维叶一贯坚持的生存条件的说法。自然选择的作用，可以使各个生物变异的部分逐渐适应其现在有机和无机的生存条件，或者使它们适应其过去的生存条件。适应在某些情况下得到器官使用和不使用的帮助，在生活的外部条件的直接作用下受到轻微的影响，而且在所有情况下都受生长和变异若干规律的支配。因

此，实际上，生存法则是较高的法则；因为通过此前的变异与适当的遗传，它已经包含了“体形一致规律”。

第七章：对自然选择学说的各种异议

我打算专门在本章中探讨反对我的观点的种种异议，以便将以前的某些论点讲得更清楚一些；但无须对全部异议一一进行探讨，因为许多作者没有经过认真思考就提出了异议。例如，一位杰出的德国博物学家断言，我认为所有生物都是不完善的，这便是我的学说中最脆弱的部分；实际上我说的是，所有生物在其生存条件下并没有尽力地达到完善；地球上不少地区的土著生物都被外来入侵生物占据了它们的位置，正好阐明了这一事实。一种生物，即使在过去很好地适应了它们的生存环境，但是如果环境发生了变化，而它们本身却不跟着变化，就不能很好地适应了；而且所有人都认为，任何地区的物理条件以及生物的数量与种类，都曾多次发生改变。

近期有位批评家，为了夸耀数学的精准性，坚持认为对于所有物种来说，长寿都有巨大的好处，因此相信自然选择的人就应将其生物系统按照后代寿命都比祖先长的方法来排列！这位批评家为什么没有想到，两年生的植物或是低级动物，如果分布于寒冷地带，一到冬天就会死亡；而假如通过自然选择获得了优势，然后通过种子或卵就可以年年再生呢？兰克斯特先生曾讨论过这个问题，他总结说，该问题极其繁复，在允许的范围之内，长寿一般与每个物种在生物系统等级中的标准，以及在繁殖与普通活动中的消耗量，是有关联的。这些条件可能大多数是由自然选择决定的。

曾有人这样议论过，埃及的动植物三四千年来都没有发生过变化，因此可能世界上所有地方都是如此。但是就像刘易斯说的，这种论点也太过分了。因为刻在埃及石碑上的或者制成木乃伊的古代家畜，尽管它们与现在的家畜十分相似，甚至相同，但是所有博物学家都认为，这些品种是由祖先类型变异形成的。自冰川时期开始，许多动物都没有发生变化，这或许是一个更有说服力的例子，因为它们经历过剧烈的气候变化，并且进行了长途的迁徙。而据我们所知，埃及的生活环境几千年来都保持不变。自冰川时期以来生物很少或没有发生变化的事实，可以用

来反对那些相信天生的和必然的发展规律的人们，但是却无力反驳自然选择即适者生存的学说。因为这一学说是指，只有在有利环境下，发生的有利变异或者个体差异才可能被保留下来。

著名的古生物学家布朗在他译的本书德文版末尾问道："按照自然选择的学说，一个变种怎么能和其亲种共同生存呢？"如果两者都可以适应略微不同的生活习性或生存环境，或许就能共同生活。如果暂时不说多型性物种（其变异性似乎拥有特别的性质）以及所有暂时性的变异，例如大小、白化症等，根据我的观察，其他较稳定的变种一般都栖息于不同的地方，例如高山与平原、干旱地区与潮湿地区等。此外，那些流动性大的和自由交配的动物，它们的变种一般都不会局限于相同的地区。

布朗还认为，不同的物种，不仅在单一性状上，而且在许多方面都有差别。他还提出一个问题，体制上的诸多构造是怎么样通过变异和自然选择作用而同时变异的呢？然而，我们没有必要设想每一生物的任何部分都同时发生变异，正如前面所说，最适应某种目的的显著变异可能很轻微，最先在一部分，然后被另一部分获得，最后通过不断变异而逐渐形成。因为这些变异都是一起传递下来的，所以让人误以为是同时发生的。然而，对上述问题最有力的答案就是那些家养品种，它们的形成是为了满足人类的某些特殊需求，通过人工选择的力量形成的。例如赛马和拉车马、西班牙猎犬和獒犬，它们的整个身体甚至是心理特征都已经发生改变了。如果我们能够找出它们变化史的每一时期（至少最近几个时期是能够找到的），那么将看到首先在一部分，然后到另一部分的轻微变异和改进，但是却无法看到巨大的和同时的变异。甚至在人类只选择某种性状，例如培育植物时，我们会发现，不管是花、果实还是叶子，都发生了巨大的变异，那么其他部分也会随之发生细微的变异。这可以用"相关生长"和所谓"自发变异"的原理来解释。

布朗和布罗卡提出了更严重的异议，他们认为，许多性状不会受到自然选择的影响，因为它们对所有者几乎毫无用处。布朗以不同种类山兔和鼠的耳朵和尾巴的长度、多种动物牙齿珐琅质的复杂皱褶，还有大量类似情况作为例证。对于植物，内格利在一篇优秀的文章中已探讨过了。他承认自然选择的强大作用，但认为各科植物之间的差异主要表现在形态学的性状上，而这类性状对于物种的利益似乎并不是特别重要。

于是，他相信生物向着更进步和更完善的方向发展，是出于一种内部趋势。他还强调指出，自然选择不可能影响细胞在组织中的排列以及叶子在茎轴上的排列。我认为，除此之外，还有花的各部分的数量、胚珠的位置以及在扩散上毫无作用的种子形状等。

上面的异议颇有分量。但是，我们应当谨慎判断：第一，什么构造现在对物种有用或曾经有用；第二，当某一部分发生改变时，其他部分也会随之发生改变，尽管其中的原因我们还不是很清楚。比如，某一部分养料的增加或减少、不同部分相互之间的压迫、先发育部分对后发育部分的影响等，以及其他我们毫不理解的原因导致了许多相关变异的神奇实例。简而言之，这些作用都可以包含在生长规律之中；第三，我们还必须考虑到，生活环境的改变引起的作用，以及自发变异的作用，但是环境的性质显然对自发变异没有特别大的作用。芽变就是自发变异的典型例子，例如普通蔷薇上出现的苔蔷薇，或者桃树上出现的油桃。即便如此，如果我们还未忘记昆虫类的一小滴毒液就足以产生树瘿，就无法确定上面所说的变异不是由于环境改变引起的，而使树液性质发生了局部变化。每一微小的个体差异以及偶然发生的较显著变异，必然有其原因。如果这种不明原因不间断地发生作用，那么该物种的几乎所有个体都会产生类似的变异。

现在看来，我在本书的前几版中可能低估了自发变异的频度和重要性。但我并不认为，可以把任何物种适合于生活习性的一切微妙构造全部归于这个原因。对具有很好的适应能力的赛马和西班牙猎犬，一些博物学家前辈在还不知道人工选择的原理之前曾对此深感惊叹，我不认为这也能用自发变异来解释。

上述一些论点，有必要举例来说明。在假定的多种构造或器官毫无作用的问题上，无须多说，即使是最熟悉的高等动物，也有许多十分发达的构造，没有人会怀疑它们的重要性。但是，它们的功能至今还未确定，或只是在最近才有了一些了解。布朗以多种鼠类的耳朵和尾巴的长度为例，说明没有特殊功用却呈现了差异的构造，尽管这不是十分重要的例子。但是根据薛布尔博士的研究，普通鼠的外耳上具有很多神经，分布方式很特殊，很显然它们是被用作触觉器官的，所以耳朵的长度非常重要。我们还发现，对于某些物种来说，尾巴是一种十分有用的把握

器官，因而其功用自然会受到长度的影响。

关于植物，由于内格利已经有相关论文，我将仅做以下说明。众所周知，兰科植物的花有多种奇特的构造。几年前，人们还认为这些构造只是形态上的差别，并没有什么特殊功能。但是现在我们已经知道了，这些构造很可能是受自然选择的作用形成的，并且借助昆虫的帮助，对植物完成受精是十分重要的。过去，人们不清楚对于二型性和三型性植物来说，雌雄蕊长短各异、排列不一样有什么作用，现在明白了。

某些植物的胚珠是直立的，也有些植物的胚珠是倒挂的。还有少数植物，同一子房内的胚珠，一个是直立的而另一个是倒挂的。乍看起来，这些现象似乎并没有生理学上的意义，只是形态上的差异。然而，胡克博士告诉我，在同一子房内，有的仅是上方的胚珠受精，还有的仅是下方的胚珠受精，他认为这可能是由于花粉管进入子房的方向不同。

不同目的一些植物，常常会开出两种花：　一种是普通结构的开放花，另一种是闭合的不完全花。这两种花的结构有时呈现出很大的差异，然而在同一植株上也可以发现，它们是慢慢地相互转变形成的。开放花可以进行异花受精，并由此获得异花受精的好处。但是闭合的不完全花也非常重要，因为它们只需要少量的花粉就产生大量的种子。就如我们前面所说的，这两种花的构造迥异。闭合的不完全花的花瓣基本上发育不全，花粉粒的直径也变小了。有一种桂芒柄花，其5本互生雄蕊都已经退化了。在堇菜属的一些物种中，3本雄蕊退化了，其余2本雄蕊虽然保留了原有机能，但已经很小了。一种印度堇菜（我不知道它的学名是什么，因为我从来没有见到其完全的花），30朵花中，有6朵花的萼片从正常的5片减少到3片。根据米西厄的看法，金虎尾科中的部分物种，闭合的花出现更进一步的变异，即与萼片对生的5本雄蕊都已经退化了，仅有与花瓣对生的第6本雄蕊是发达的；但是这些物种的普通花，却没有这一雄蕊，而且花柱发育不全，子房从3个减少为2个。虽然自然选择有足够的力量去阻止某些花绽放，而且能够让闭合花的花粉量减少，但是上面的各种特殊变异并不能由此决定，而是应当受生长规律支配。在花粉减少和花闭合的过程中，某些部分在功能上的不活动也包含在生长规律之中。

由于生长规律的重要性，我要再举另外一些例子，来说明同一部分或同一器官由于在同一植株上的位置不同而有所不同。根据沙赫特的观察，西班牙栗树和一些冷杉树的叶子，它们分杈的角度，在接近水平和竖立的枝条上是不同的。在普通芸香及其他一些植物中，中央或顶端的花往往是先开的，生有5个萼片和5个花瓣，子房也是5室，而其余部位的花却都是4数的。英国的五福花属，其顶花通常只有2个萼片，而花瓣和子房则是4个，周围的花除萼片数为3外，花瓣和子房皆是5个。许多菊科、伞形花科以及其他植物周围花的花冠比中央花的花冠发达得多，而这可能是它们生殖器官退化了的缘故。还有一个更奇妙的现象，前面我们已经讲过了，即外面和中间的瘦果和种子，在形状、颜色及其他性状上通常也互不相同。在红花属和一些其他菊科植物中，只有中央的瘦果长有冠毛；而在猪菊苣属中，同一头状花序上长有三种形状各异的瘦果。根据陶施的看法，有些伞形科的植物，生长在外面的种子是直生的，而中间的种子是倒生的；德康多尔认为，这一性状对于其他物种在分类上十分重要。布朗教授提到过紫堇科的一个属，其穗状花序下部的花结出的是小坚果，呈卵形，有棱且包含了一粒种子，而上部的花结出的是长角果，呈披针形，有2个蒴片且包含了2粒种子。在这几种情况中，除了能够吸引昆虫的非常发达的小边花外，自然选择实际上并未发生作用，或仅仅起到十分次要的作用。所有这类变异，都是各部分的相对位置及其相互作用的结果。毋庸置疑的是，假如同一植株上的全部花和叶，都像在某些部位上的花和叶一样，受到同样的内部与外部条件的影响，那么它们都会按照同样的方式发生变化。

在众多其他的情形中，我们发现，通常植物学家认为具有高度重要属性的构造变异仅出现在同一植株的部分花中，或发生在同样外部环境下密集生长的不同植株上。由于这些变异对植物没有什么特殊的用途，因此它们不会受到自然选择作用的影响。对于这些变异的原因，我们知之甚少，甚至不能将其归类。接下来，我列举几个例子。在同一植株上花的数量为4数或5数，是很常见的事情。但是，当花的部件数量不多时，其数量上的变异也不会多见。德康多尔说，大红罂粟的花，具有2个萼片和4个花瓣（这是罂粟属的一般类型），或者3个萼片和6个花瓣。花瓣在花蕾中的折叠方式是众多植物的一种非常稳定的形态学性状，然而阿萨格雷教授说，属于金鱼草族的沟酸浆属中的一些物种，其

花瓣的折叠方式既像喙花族的，又像金鱼草族的。圣提雷尔曾举出以下例子： 芸香科是单一子房的植物，但本科的花椒属中部分物种的花，在同一植株甚至同一圆锥花序上，既有一个也有两个子房的。半日花属的蒴果，既有1室的，也有3室的；而变形半日花却“有一个稍微宽阔的薄隔，隔开果皮与胎座”。马斯特斯博士通过观察得知，肥皂草的花既长有边缘胎座，又长有游离的中央胎座。在油连木分布区域靠近南段的地方，圣提雷尔发现了两种类型，最初他坚定地认为这是两个不同的物种，直到后来他看到它们生长在同一灌木上，于是又补充道：“同一个体的子房和花柱，有的生在直立的茎轴上，有的却生在雌蕊的根基部位。”

综上所述，许多植物形态上的变化都与自然选择无关，而是生长规律以及各部分之间的相互作用引起的。但是内格利提出，生物倾向于朝着完善或进步的方向发展，然而这些显著变异的情形，能够说明这些植物是在朝着较高级的发展状态前进吗？与此相反，我仅从同一植株上花的各部分不相同或差异巨大这一事实就可以推断出，无论这类变异在分类上有多么重要，对于植物本身却无关紧要。一个无用部分的获得，决不能说成是提高了生物在自然界的等级。对于前面描述的不完全闭合花的情况，无论用什么新的原理来解释，它都必然是一种倒退，而不是进步；大量寄生的和退化的动物，也是如此。我们还不太了解上述特殊变异的原因，但是，如果这种未知原因长期地发生作用，我们便能够推测，其结果也是一致的；并且在这种情况下，该物种的所有个体将通过相同的方式发生变异。

上述各种性状对物种生存都无关紧要，因此出现的任何轻微变异，都不会被自然选择积累和增加。一种经长期连续选择而形成的构造，一旦对物种没有用处时，就容易发生变异。正如我们见到的残迹器官一样，因为它已不再受相同的选择力量支配。但是，如果由于生物本身和环境的性质引起了某些变异，而这些变异对该物种的生存无关紧要，则这些变异通常会以几乎相同的状态遗传给无数在其他方面已经发生变异的后代。有没有长毛、羽或鳞，对于许多哺乳类、鸟类或爬行类来说并不重要；然而，几乎所有哺乳类都有毛，所有鸟类都有羽，真正的爬行类都有鳞。不论什么构造，只要是大量相似类型共有的，我们就会认为它在分类上具有高度的重要性，往往会假定它对物种具有关乎生死的重

要性。所以我更相信，我们认为的形态上的重要差异，例如叶的排列、花或子房的差异、胚珠的位置等，最初大多是以不稳定变异而产生的，之后早晚会因为生物和周围环境的性质，或通过不同个体间的杂交，才稳定下来，而不是自然选择作用的结果。由于这些形态性状对于物种的利益没有影响，因此它们任何细微的变异都不再受自然选择的支配和积累。于是我们便得出一个奇妙的结论，即：对物种生存无关紧要的性状，对于分类学家来说却是至关重要的。然而，当我们以后讨论分类的遗传学原理时，便会知道它绝不像乍看之下那么矛盾。

虽然还没有确切的证据可以证明，生物具有一种朝着进步发展的内在趋势，但就像我在第四章中尝试指出的那样，通过自然选择的连续作用必然会获得这样的结果。器官专业化或分化达到的程度，是定义生物发展高低的最好标准；自然选择会促使各器官朝着这个目标前进，这样各个器官就能更有效地行使它们的功能。

著名的动物学家米瓦特先生，搜集了最近我及他人对于自然选择学说的所有异议，并且以高超的技巧进行了阐述。那些异议一经整理，似乎就很有说服力了，但是米瓦特并不打算将那些与他的结论相对立的各种事实和推论都列举出来，因此读者要权衡双方的证据，费力地去推理和记忆。在谈到特殊情况时，米瓦特又省略了生物各部分增强使用与不使用的效果，而我一直认为这一点十分重要，并且我在《家养状态下的变异》一文中对此进行了最详细的讨论。此外，他经常认为我没有考虑到与自然选择无关的变异。但是与此恰恰相反，在上述一文中，我搜集了大量真实的例子，其数量比其他任何我知道的著作都多。我的推论并不一定可靠，然而在仔细阅读了米瓦特的书之后，我将他书中的每一部分都与我在同一题目中所做论述加以比较，结果发现本书所得的结论具有广泛的真实性，当然，因为这个问题如此复杂，所以难免会出现一些小差错。

米瓦特先生提出的异议，有些已经讨论过了，其余那些将在本书中加以讨论。其中一个让许多读者产生了共鸣的新观点是："自然选择无法解释有用构造的初期阶段。"这一问题类似于时常伴随机能变化的各性状的级进变化系。例如，在前一章中讨论过的由鳔到肺的转变。即使这样，我还是想详细讨论米瓦特先生所提的一些问题。由于篇幅有限，我

选择其中最有代表性的几个。

长颈鹿身材高挑，颈、前腿和舌头都很长，它的整体构造非常适合取食较高的树叶。因此在同样的地区，它可以获得其他有蹄类无法接触到的食物，对于长颈鹿来说，这有利于它们渡过饥荒时期。南美洲尼亚塔牛的情况证实，即使再微小的构造差异，在饥荒时期也会对动物能否存活下去产生巨大的影响。这种牛与其他牛一样会吃草，但由于它的下颌突出，所以在持续干旱的时节，就无法像普通牛马一样取食树枝和芦苇等，如果主人不喂养它们，它们就会死亡。在讨论米瓦特的异议之前，我们先来了解自然选择在一般情况下是如何发生作用的。人类已经改变了一些动物，但是没有专注于其构造上的独特之处，例如对于赛马和西班牙猎犬，只保留和繁殖跑得最快的个体；对于斗鸡，仅从斗胜者中挑选并加以繁育。自然状态下初始阶段的长颈鹿也是如此，在饥荒时期，那些能从高处取食的个体也会被自然选择保留下来，因为它们会在整个区域搜寻食物。同一物种的不同个体之间，通常在身体各部分的相对长度上有细微的差别，许多自然史的著作中都有过相关论述，并且列举了详细的度量。对于大部分物种来说，这些由生长规律及变异规律导致的比例上的细微差异几乎没有任何用处。但是考虑初始阶段长颈鹿可能存在的生活习性，情况就不同了，那些身体的某一部分或某些部分比普通个体稍长的个体，通常都可以生存下来。存活下来的个体进行交配产生的后代，会遗传相同的身体特征，或者具有以相同方式再变异的趋势，而在这些方面不太适应的个体一般容易灭亡。

在自然状态下，自然选择不需要像人类那样，有计划地进行隔离繁育，而是通过保存所有优良个体，并让它们自由杂交，从而将所有劣等个体消灭。这种自然选择的过程持续地作用，与人工无意识选择的过程一样，并且必然以极其重要的方式与肢体增强的遗传效应相结合，我想一定可以使一种普通的有蹄类逐渐转变成长颈鹿。

对此，米瓦特先生提出两点异议。一是，身体增大需要的食物供给显然会更多。他认为：“由此引发的不利，在饥荒时期是否会与由此获得的利益相抵消，便很成问题”。然而现在非洲南部确实生存着大量的长颈鹿，而且那里还有一些世界上最大且比牛还高的羚羊。因此，就体型大小而言，我们就不能怀疑，经历过像现在一样严重饥荒的中间过渡类型

曾经在那里出现过。对于初始阶段的长颈鹿来说，各个阶段体型的增高使它能够取食当地其他有蹄类无法吃到的食物，这肯定是有好处的。还有一个无法忽略的事实，那就是身体增大可以抵御除狮子外几乎所有的猛兽。而且颈部越长，越有利于防范狮子，正如赖特所说的，可以把颈部用作瞭望台。因此贝克爵士说，想要偷偷地靠近长颈鹿，比靠近任何其他动物都难。长颈鹿剧烈地摇动生有断桩形角的头时，也可以将颈部作为攻击或防御的武器。一个物种的生存不可能取决于任意一种优势，而是取决于所有优势的联合作用。

米瓦特先生还提出疑问（这是他的第二点异议），如果自然选择的力量如此巨大，高处取食有如此大的利益，那么除了长颈鹿和稍矮一些的骆驼、羊驼和长头驼之外，为什么其他有蹄类动物没有那样长的脖子和那样高的身材呢？又为什么没任何有蹄类动物生有长吻呢？由于曾经有大量的长颈鹿栖息在南美洲，回答这一问题比较容易，并且还可以举出一个实例。在英格兰的每一块草地上，我们都能见到一些低矮的树枝茬，因为被牛马啃食过而被修剪成了同等的高度。对于生活在那里的绵羊，如果长出了稍长的脖子，这对它们来说又有什么优势呢？在某个区域内，总会有一种动物比其他动物能取食更高；而且差不多可以肯定的是，只有这种动物能够通过自然选择的作用和增加使用的效果，为了取食更高的食物而使颈部变长。在南非，为了吃到金合欢属及其他植物的上层枝叶，出现的竞争只会发生在长颈鹿与长颈鹿之间，而不是在长颈鹿与其他有蹄类动物之间。

在地球上的其他地方，有许多属于此目的动物，为什么它们没有获得长颈或者长吻呢？这个问题我们无法做出明确的回答。然而，就如同为什么人类历史上某些事件只发生于某国而没有发生在另一国一样，期望明确解答这一问题是没有道理的。我们并不清楚每一物种的数量和分布取决于什么，也无法推测，什么样的构造变化有利于它在某个新地域数量的增加。但是，我们大致上可以看出影响长颈或长吻发展的种种原因。有蹄类动物的构造并不适合爬树，因此如果它们要取食高处的树叶，就必须增大它们的躯体。我们了解到，在某些地区，例如南美洲，虽然草木非常茂盛，但是很少有大型四足兽。而在南非，大型兽数不胜数。我们不清楚为什么会这样，也不知道为什么第三纪后期比现在更适

合它们的生存。无论是什么原因，我们都会发现，某些地区和某段时期总会比其他地区和其他时期，更加有利于长颈鹿之类的大型四足兽发展。

一种动物为了获取某种特别的构造，得到巨大的发展，许多其他部分几乎也会发生变异和相互适应。虽然身体每个部分都会发生轻微的变异，但是重要的部分并非总是按照适当的方向和适当的程度发生变异。我们已经清楚，不同物种的家养动物，它们身体的各部分变异方式和程度各不相同，而且有的物种比其他物种更容易变异。即使确实发生了合适的变异，自然选择也不一定会对它们产生作用，进而形成对该物种明显有利的结构。例如，假如一个物种在某地区的个体数量主要取决于食肉兽的侵害，或内部及外部寄生虫等的侵害情况（确实经常出现此类情况），那么，对于为了更好地取食而产生的任何特殊构造的变异，自然选择所起的作用都不会很大，甚至可能极大地阻碍这种变异的发展。而且，自然选择是一种缓慢的过程，要获得任何显著的效果，就必须保持有利条件长期不变。除了这些一般的和不太明确的理由之外，我们的确很难解释，在世界上许多地方，为什么有蹄类没有获得很长的颈或其他器官，以便取食较高的树叶。

不少作者都曾提出了和上面性质相同的异议。在任何情形中，除了刚讲过的一般原因之外，可能还存在各种原因，会妨碍自然选择对假定对某一物种有利的构造发挥作用。有一位作者问道，鸵鸟为什么不能飞翔呢？只要稍微思考一下便会清楚，这种在沙漠生存的鸟类，由于身体巨大，若要获得在空中飞翔所需的力量，得消耗多么巨大的食物量。海岛上栖息有蝙蝠和海豹，可是没有陆栖哺乳类。然而，有些蝙蝠是特殊的物种，它们一定在海岛上生活了很长时间。因此莱伊尔爵士提出了疑问：为什么在这些岛屿上，海豹和蝙蝠没有繁殖出适于陆地上生活的动物呢？对此他还给出了一些理由。如果要发生改变，海豹首先会转变为巨大的陆栖食肉动物，而蝙蝠会先变成陆栖的食虫动物。对于海豹，岛上没有可以捕食的动物；对于蝙蝠，尽管可以以地面上的昆虫为食，但是绝大多数昆虫早已被先移居过来且数目繁多的爬行类和鸟类吃掉了。构造上的级进变化在每一阶段都对变化着的物种有益，这只在某些特殊的情况下才会发生。一种严格意义上的陆栖动物，最初只是偶尔在浅水

中猎取食物，然后慢慢进入小溪或湖泊，最后才可能完全变为在大海栖居的水栖动物。但是在海岛，没有利于海豹逐渐重新转变为陆栖动物的条件。至于蝙蝠，前面已经讲过，其翅膀的形成，最初可能是像所谓飞鼠一样，为了躲避敌害或者避免跌落，在空中由一棵树滑翔到另一棵树。可是一旦可以真的飞翔之后，至少为了前面所说的目的，绝不会再变回到效果不佳的空中滑翔能力中去。的确，蝙蝠也可以像某些鸟类一样，因为不使用翅膀而导致其退化或消失；在这种情况下，它们必须首先获得仅依靠双腿就能在地面上快速奔跑的能力，从而使其可与鸟类或其他地上动物竞争；但是这种变化非常不适合蝙蝠。上述这些推想只是为了说明，对每一阶段都有利的构造上的改变，实在是一件非常复杂的事情；同时，在任何一种特定的情况中，没有发生构造转变也不足为奇。

最后，不止一个作者问道，如果智力的发展对所有动物都有利，为什么有些动物的智商比其他动物的智商高得多呢？为什么猿类的智商没有人类那样发达呢？对此我们可以给出各种理由，但都只是猜测，并且不能权衡它们的相对可能性，所以列举出来用处也不大。不要期望有人可以做出确切的解答，因为还有一个更简单的问题没有解答，即在两族未开化的人中，为什么其中一族的文明水平会比另一族的高？文化水平的提高，明显意味着智力的提高。

我们再回头看米瓦特先生的其他异议。昆虫为了自我保护，使自己与各种物体相似，如绿叶、枯叶、枯枝、地衣、花朵、荆棘、鸟粪以及别的活昆虫，至于最后一点，留到以后再讲。这种相似通常不只局限于体色，甚至连形状以及保护自己身体的姿态，都模仿得惟妙惟肖。以灌木为食的尺蠖，常常拱起身体，纹丝不动犹如一根枯枝，这是一个很好的拟态的例子。而模拟类似鸟粪物体的例子非常少见且很特殊。针对这个问题，米瓦特先生说：“按照达尔文的学说，生物有一种产生不定变异的稳定倾向，并且由于微小的初期变异是多方面的，因此这些变异必然会彼此抵消，且变异刚出现时是不稳定的。如果是这种可能的话，就很难解释，为什么极其微小的初期不稳定的变异会达到与叶子、竹子或其他物体极其相似的程度，并且可以为自然选择利用和长久保存。”

在上面所有的情况中，这些昆虫最初的状态，通常和它们生活环境

中某种常见的物体，肯定存在一些大致的和偶然的类似性。但是想想各种各样的昆虫的形态和颜色是多种多样的，而且周围物体的数目无穷无尽，就知道这种说法完全是有可能的。这种大致的相似性对于最初的开始是非常必要的，因此我们便可以明白，为什么没有较大的和较高等的动物（据我所知，有一种鱼除外），为了保护自己，与其他特殊的物体相似，而只是与周围物体的表面相似，并且主要是颜色上的相似。假设有一种昆虫，最初在某种程度上偶然与枯叶或枯枝出现了相似的情况，并且朝多个方向发生了轻微变异，在这些变异中，只有能使这种昆虫更像枯枝或枯叶的变异因为有利于避开敌害会被保留下来，而其余变异就被忽视而最终消失掉。或者，如果有些变异使昆虫不像其模仿的物体，也会因此被消除掉。假如我们不用自然选择的作用来说明上述情况，而只是用不稳定变异来解释，那么米瓦特先生的异议的确很有说服力，事实却并非如此。

华莱士先生举出了一种竹节虫拟态的例子，它很像“一支长满鳞苔的木棍”，这种相似如此逼真，以至于当地的带亚克人坚称这棍上的叶状赘生物是真正的苔。米瓦特先生认为这种“非常完美的拟态技能”很难解释，对此我看不出有何力量。比起我们人类，以昆虫为食的鸟类和昆虫的其他天敌的视觉可能更敏锐，因此对于昆虫来说，无论是何种程度的拟态，只要能帮助它们躲避天敌，就有被保留下来的趋势。而且这种拟态越完美，对昆虫就越有利。试想一下竹节虫这一类群昆虫种间变异的性质，这种昆虫表面变得不规则以及多多少少带有一点绿色，并非是不可能的。因为在每一类群的生物中，几个物种之间不一样的性状最容易发生变异；而属的性状，即该属各物种具有的共同特征，则是最稳定的。

格陵兰的鲸鱼是世界上最奇特的动物，鲸须或鲸骨是它最大的特征。上颌的两侧各有一行鲸须，每行约有300片，对着嘴的长轴紧密地横排着，在主行之间还有一些副行。所有须片的末端和内缘都磨损成了刚毛，刚毛遮蔽了整个巨大的颚，作为滤水之用，由此获取这种巨型动物赖以为生的微小食物。格陵兰鲸鱼最长的须片长达3.05米（10英尺）、3.66米（12英尺），甚至4.57米（15英尺）。但鲸类不同物种的须片长度有不同的等级。据斯科雷斯比说，某一物种的鲸鱼，中间须片

长1.22米（4英尺），另一种则长0.91米（3英尺），还有一种仅长0.46米（18英寸），而长吻鰛鲸的须片长度大约只有0.23米（9英寸）。鲸骨的性质也随物种不同而各不相同。

对于鲸须，米瓦特先生讲道，当它“只有达到有用的大小和发展程度时，自然选择才会在有用的范围内帮助它的保存和增大。但是如何达到这一有用范围的初始状态呢？”在回答之前我们可以试问，长有鲸须的鲸鱼的早期祖先，为什么它们的嘴不像鸭嘴那样具有栉状片呢？鸭与鲸鱼一样，也是通过滤掉泥和水来获取食物的，所以有时候会称这一科为筛口禽类。请不要误以为我的意思是鲸鱼祖先的嘴的确和鸭嘴构造相似。我只是想说明这并不是不可思议的。也许格陵兰鲸鱼巨大的须片，最初是从栉状片经过了很多细微的渐进过程发展而成的，而且每一步骤对该动物本身都是有用的。

琵琶嘴鸭嘴的构造，比鲸鱼的更奇妙复杂。根据我对那些标本的观察，在其上颌的两侧都有一行栉状构造，是由188个富有弹性的薄栉片组成的。这些栉片对着嘴的长轴横长着，斜列成尖角形。它们都是从颚长出来，靠一种韧性膜附着于颚的两侧。位于中央附近的栉片最长，约为0.8厘米（1/3英寸长），突出边缘下方约0.4厘米（0.14英寸）。在它们的底部，另有一些斜着横向排列的隆起，形成了一个短的副行。这几方面都和鲸鱼的鲸须相似。但是在鸭嘴的前端却大不相同：鸭嘴的栉片是向里倾斜的，而不像鲸鱼一样向下垂直。琵琶嘴鸭的整个头部，尽管与鲸没有可比性，但和须片仅长22.9厘米（9英寸）、中等大小的长吻鰛鲸相比，是它头长的1/18左右。假如把琵琶嘴鸭的头放大到和这种鲸的一样，那么它的栉片就长达15.2厘米（6英寸），长度相当于这种鲸须的2/3。琵琶嘴鸭的下颌也生有与上颌上长度相同的栉片，只是细一些；很明显这与鲸鱼的下颌完全相同，鲸鱼的下颌是不长鲸须的。另一方面，它的下颌的栉片顶磨成了刚毛，这一点却又和鲸须非常相似。海燕科的锯海燕属，也仅在上颌上生有很发达的栉片，超出了颌的边缘，在这一点上，这种鸟的嘴和鲸鱼的嘴是类似的。

根据萨尔文先生赠送给我的资料和标本，我们可以观察到高度发达的琵琶嘴鸭嘴的构造，就从其适应滤水取食这一点来说，就能够先通过湍鸭的嘴，再通过鸳鸯的某些方面，一直追踪到普通家鸭，中间并没有

大的间断。与琵琶嘴鸭相比，家鸭嘴内的栉片要粗糙得多，并且牢牢地生长在颌的两侧，每侧50个左右，也没有超过嘴缘的下方。其顶端呈方形，边上嵌着半透明的坚硬组织，似乎是用来磨碎食物的。下颌边缘上横生着大量微微突起的小细棱。这种嘴如果用作过滤器，远比不上琵琶嘴鸭的嘴，但是众所周知，家鸭经常用它来滤水。萨文尔先生告诉我，另外有一些物种的栉片没有普通鸭那么发达，但我不知道它们是否被用来滤水。

接下来讨论此科内的另一类动物埃及鹅，它的嘴和普通家鸭的嘴很相似，不过它的栉片没有家鸭那么多，也没有那么明显，并且向内突出的程度也要小一些。但是巴特利特先生告诉我，这种鹅“像家鸭一样，会把水从嘴角排出”。它主要是食用草本植物，吃草的方式和普通家鹅相同。与家鸭相比，家鹅上颌的栉片要粗糙得多，每侧有彼此混长的栉片27个，上部末端长成了齿状的结节，颚部也布满了坚硬的圆形结节。下颌边缘的牙齿呈锯齿状，比鸭嘴还要突出、粗糙和尖锐。家鹅的嘴不需要用来滤水，而是完全用于撕开或切断草类。它的嘴非常适合做这个，几乎能从靠近根部的位置切断草类，这一点其他任何动物都比不上。巴特利特说，另外一些品种的鹅的栉片还不如家鹅发达。

由此可见，某种鸭科物种，其嘴的结构和普通鹅一样，仅适于吃草，甚至有一个物种具有更不发达的栉片，通过连续的微小变异也可能演变为像埃及鹅那样的物种，进而演变为像普通家鸭一样的物种，最终演变为像琵琶嘴鸭那样的物种，从而具有几乎完全适合滤水的嘴。因为这种鸟除了嘴端的带钩的前段之外，其他部分几乎无法啄食或撕碎食物。我还要进一步说明的是，家鹅的嘴也可能通过连续的微小变异最终演变成同一科的秋沙鸭那样的嘴，嘴里有突出且带倒钩的牙齿，但是其作用却和家鹅的很不相同，是用来捕捉活鱼的。

再回来讨论鲸鱼。无须鲸鱼没有真正有用的牙齿。但根据拉塞佩德的说法，它的颌长有小型且不等的粗糙的坚硬角质尖头。因此假设某些原始的鲸类，颌上也有与之类似的角质尖头，排列得稍微整齐一些，就像鹅嘴上的结节那样，可以帮助攫取和撕裂食物。如果是这样的话，几乎可以肯定，通过变异和自然选择，这类角质尖头有可能演变为埃及鹅那样的非常发达的栉片，同时具有捕食和滤水两种功能，接着再演变为

家鸭那样的栉片。直到通过连续演变产生了像琵琶嘴鸭那样的栉片，形成了专门用于滤水的构造。从栉片长达长吻鲲鲸须片的2/3这个阶段起，通过我们现在可以看到的一些中间过渡类型，可以将我们引导到格陵兰鲸鱼的巨大须片上去。毫无疑问，就像现在鸭科的不同物种的嘴的逐级进化一样，古代鲸鱼器官演变的每一个步骤对处于发展进程中器官功能正在慢慢变化着的鲸鱼都是有用的。我们必须牢记，每一种鸭都处于激烈的生存斗争中，而且它们身体的每一部分构造都必须很好地适应生活环境。

比目鱼科以身体不对称而闻名，它们是侧躺着休息的，大部分物种是左侧，但有一些是右侧，有时也会出现相反的个体。下侧面，即躺着的那一侧，最初看来与普通鱼的腹面相似，呈白色，在很多方面都没有上侧的发达，侧鳍通常也较小。它的眼睛非常特别，都长在头的上面。幼苗时期，左右两侧的眼睛、整个身体以及两侧颜色都是对称的。很快，下侧的眼睛便绕着头部慢慢地移到了上侧，不过并不是以前推测的那样直接穿过头骨。很明显，如果下侧的眼睛移动到上侧，在鱼习惯地靠一边躺卧时，就无法使用这只眼睛了，下侧的眼睛也容易被底部的沙子磨伤。比目鱼扁平的体形和不对称的构造，巧妙地适应了它的生活习性。这种情况在鳎、鲽等诸多物种中都很常见。由此获得的主要利益，大概在于可以躲避敌害，而且易于在海底获取食物。然而希阿特说，从比目鱼科许多不同的物种中，“可以列举出一系列的过渡类型，从孵化后形态没有任何变化的庸鲽，直到完全侧卧的鳎为止”。

对于这种情况，米瓦特先生说，比目鱼眼睛位置的突然自发地转变是令人难以置信的，我同意他这个看法。他还说：“假如这种转移是逐渐发生的，那么在向头的另一侧转移的过程中，很小的位置变化是如何对个体有利的，实在难以解释清楚。这种早期的转移，与其说有利，还不如说有害。”然而在马姆1867年发表的作品中，他已经对这一问题给出了答案。当比目鱼小且对称时，它们的两眼还是分别位于头的两侧的，但是由于身体太高，侧鳍小，又没有鳔，所以无法长时间保持直立。于是很快就会困倦，朝一边掉到水底。根据马姆的观察，比目鱼在侧卧时，下侧的眼睛为了观察上面的物体，经常会向上转动。由于转动眼睛时用力太大，致使眼球紧紧地抵住了眼眶的上侧，这样两眼间的额部宽

度会暂时缩小，这一点可以清楚地观察到。有一次，马姆看到了一条幼鱼，其下眼提高和下压时的角距可达大约70°。

我们应当知道，幼年时的头骨柔软可屈，因此容易受到肌肉运动的牵制。而且我们知道，高等动物即使在幼年的早期之后，如果它们的皮肤或者肌肉因疾病或意外事故长期收缩，头骨形状也会发生改变。长耳兔的一只耳朵如果向前或向下低垂着，耳朵的重量就足以牵动这一侧的所有头骨前倾，对此我还画过一幅图。马姆说，鲈鱼、鲑鱼以及其他一些对称鱼，新孵化的鱼苗常常也会侧卧在水底。他还观察到，这些幼苗侧卧时会牵动下方的眼睛朝上看，因此头骨会变歪，但是很快就能维持直立的姿势，所以不会因此产生长期的效果。但是比目鱼就不一样，因为身体随着年龄的增大越来越扁平，就会越习惯向一边侧卧，所以头的形状和眼的位置便成永久性的了。我们还可以类推，遗传原理会逐渐增强这种歪曲的倾向。希阿特的观点与某些博物学家恰好相反，他认为比目鱼可能在胚胎期就已经不那么对称了。如果是这样的话，我们就能理解为什么有些物种的鱼在幼年期习惯于左侧卧休息，而另外一些却习惯右侧卧休息。为了证实上面的观点，马姆又说：不属于比目鱼科的北粗鳍鱼，长大之后也是左侧卧，而且游泳时身体是倾斜的，据说这种鱼头部的两侧不是完全一样的。鱼类学权威京特博士曾引述了马姆的论文，并加以评论：“对于比目鱼科鱼的奇特状况，作者做出了一个非常简单明了的解释。”

由此可见，米瓦特先生认为，比目鱼的眼睛由头部的一侧移向另一侧的初期阶段是有害的，但这是由于侧卧于水底时眼睛尽力朝上看的习性导致的，而这种转移的最初阶段显然无论对个体还是物种都是有利的。有几种比目鱼，嘴朝下侧面弯曲，头部没有眼睛那一侧的颚骨要比另一侧的强壮有力，特蕾奎尔博士推测，这样有利于在水底取食。对于这种情况，我们可以解释为使用效果的遗传所致。另一方面，包括侧鳍在内的整个下半部分都不太发达，这种情况可以由不使用的结果来解释。尽管耶雷尔认为，下侧鳍的缩小对鱼是有利的，因为“与上侧大的鳍相比，下侧鳍的活动空间要小得多”。斑鲽的上颚骨只有4到7个牙齿，但下颚骨却有25到30个牙齿，这种牙齿数目的比例也可通过不使用解释。根据大多数鱼类和许多其他动物的腹部呈白色的情况来看，我们

有理由推断，比目鱼的下侧，无论是左边还是右边，呈白色都是因为光线的缺乏。但是，鳎鱼上侧很像沙质海底的奇特斑点，或者像波歇最近提出的可以根据周围表面而改变它们颜色的种类，又或者大菱鲆身体上侧的骨质结节，这些情况却不能假定是由光的作用引起的。这可能是由于自然选择发挥了作用，就如自然选择使这些鱼类的一般形态和诸多其他特征都能适合它们的生活习性一样。我们必须记住，就像我以前主张的那样，自然选择会加强各部分增加使用或不使用的遗传效果。因为朝着正确方向发生的一切自发变异都会因此被保留下来，这与任何部分的增加使用和有利使用的效果被最大限度地遗传下来的那些个体会被保留下来是同样的道理。几乎很难确定在每种特定的情况下，到底有多少能归因于使用的效果，多少归于自然选择的作用。

我可再举一例来说明，一种构造的起源显然是由于使用或习性的作用。有些美洲猴的尾端，已经成为一种极完善的抓握器官，并且可以将其作为第五只手。一位完全赞同米瓦特先生观点的评论家，关于这种构造说道："不论这种抓握倾向从什么年代开始，要说最初这个倾向会帮助美洲猴个体获得生存和繁育后代的机会，是令人难以置信的。"但是，这样的观念并没有必要。习性几乎代表着可以由此获得或大或小的利益，习性或许能够实现这样的作用。布雷姆曾看到一种非洲猴的幼仔，在用双手抓着母猴腹部的同时，还用它的小尾巴钩住母猴的尾巴。亨斯洛教授饲养过一种欧洲田鼠，其尾巴的构造并不适合抓握，但他经常发现它们用尾巴绕着笼子里的一小丛树枝，借此帮助它们攀缘。京特博士曾做过一个类似的报告，他见过一只鼠用尾巴将自己挂起来。如果这种欧洲田鼠有更完全的树栖习性，那么它的尾巴可能就像同一目内某些其他种类一样，在构造上已经适应于抓握了。考虑到非洲猴幼仔具有的这种习性，可是为什么后来尾巴却没有成为抓握的工具呢？这个问题很难回答清楚。但是这种猴将长尾巴当作大幅度跳跃的平衡器官，比当作抓握器官更有用。

乳腺是哺乳纲所有动物都有的，对于它们的生存也是不可缺少的，因此它们必然在极其遥远的时代就已经形成了。我们一点儿也不清楚乳腺的发展过程。米瓦特先生问道："谁能够想象，某一种动物的幼仔，偶然从它的母亲膨胀的皮腺上吸了一滴没有什么营养的液体，就能够免于

死亡？即使有一个动物是这样，那是什么使这种变异永久持续下去呢？”显然，提出这一问题并不恰当。大多数进化论者都认为哺乳动物都是有袋动物的后裔，如果真是这样的话，那么乳腺最初必定是在有袋动物的育儿袋内发展的。海马的卵就是在这样的育儿袋中孵化的，而且幼体在一定时期内也是在育儿袋内进行哺育的。美国的博物学家洛克伍德先生根据他对海马幼鱼的观察，认定海马是用此袋内皮腺的分泌物来养育后代的。哺乳动物早期的祖先在可以被称为哺乳动物之前，难道不可能是用类似的方式来养育幼体的吗？而且在这种情况下，那些分泌了类似乳汁且在某种程度上最有营养的液体的个体，比那些分泌液体营养较差的个体，肯定能养育更多营养良好的后代。因此，与乳腺同源的皮腺就会得到改进或变得更有用。根据普遍应用的特殊化原理，袋内特定部位的腺体会变得比其他部位的腺体更加发达，于是就变成了乳房。但有袋动物最初是没有乳头的，就如同我们在最低等的哺乳动物鸭嘴兽中观察到的一样。我也无法断定，究竟是由于生长的补偿作用，还是使用的效果，又或者是自然选择的作用，才使得特定部位的腺体变得比其余部位的更特殊化。

只有幼仔食用这种分泌物，乳腺的发展才有用，否则自然选择无法对它的发展起作用。要弄懂哺乳动物的幼仔如何本能地知道吮吸乳汁，就如同弄懂未孵化的雏鸡如何懂得用非常适应的嘴轻轻敲破蛋壳，或如何在刚出壳几小时之后就懂得啄食谷粒，都是非常困难的。在这种情况下，最可能的解释就是，最初这种习性是年长的个体通过实践获得的，然后传递给了年幼的后代。但是，有人说年幼的袋鼠并不吸乳，只是紧紧含着母体的乳头，然后母兽会将奶汁射进幼仔柔弱的、半成形的口中。对此，米瓦特先生说：“假如没有特殊的构造，小袋鼠就会因乳汁被射入气管而窒息。但是，确实有这种特殊的构造，它的喉头极长，一直通向鼻管的后端，因此空气就能自由进入肺部，而乳汁则可以安全地通过这加长了的喉头两边到达位于后面的食管。”米瓦特先生又问道：自然选择如何除去成年袋鼠和大多数其他哺乳动物（假如它们的祖先是有袋类）中“这种至少是完全无益又无害的构造呢”？我们可以这样回答：对于许多动物来说，发声是非常重要的，如果喉头通入鼻管，就无法用全力发声了。并且弗劳尔教授曾经告诉我，这种构造会大大阻碍动物吞咽固体食物。

现在我们简单说一下动物界中比较低等的门类。棘皮动物（如海星、海胆等）长有一种引人注目的器官，人们称之为叉棘。发达的叉棘呈三叉钳形，也就是由三个锯齿状的臂组成。三个臂巧妙地配合在一起，位于一个可以伸缩的、由肌肉牵动的柄的顶端。这些钳子能够牢牢地夹住所有东西。亚历山大·阿加西斯曾看到，一种海胆迅速地把排泄物的细粒由一个钳子传到另一个钳子，顺着身体特定的几条线路传递下去，以防弄脏了它的外壳。但是除了移去各种污物之外，叉棘必定还有其他作用，其中一个明显的作用是防御。

关于这些器官，米瓦特先生又问道："这样的构造，在其初期的萌芽阶段有什么作用呢？而且这种初期的萌芽如何保护一个海胆的生命呢？"他接着补充说："即使这种钳状物的作用是突然形成的，假如没有自由运动的柄，这种作用也没有什么益处。同样，如果没有可以夹住物品的钳，这种柄也是没有用的。可是仅凭细微的不定变异，是无法同时逐渐形成这些复杂而协调的构造的，如果否认这一点，就等于承认了一种完全自相矛盾的谬论。"尽管米瓦特先生认为这一点好像是自相矛盾的，而确实有些海星具有固定不动的基部，但却具有可以夹住物品的三叉棘，如果它们部分地将其作为一种防御工具，那这个问题就容易回答了。对此问题，阿加西斯给我提供了很多资料，令我万分感激。他告诉我，有些别的海星，三只钳臂中一只已经退化成另外两只的支柱。另外，还有一些别的属，第三只钳臂已经完全消失了。根据佩雷尔先生的描述，斜海胆的壳上有两种叉棘，一种与刺海胆的叉棘相似，另一种与猬团海胆相似。这种情况往往令人感兴趣，因为它们可通过一个器官两种形态之一的消失，给人们提供一个器官明确的突然过渡的实现方式。

对于这些奇特器官的演化步骤，阿加西斯根据自己和米勒先生的研究推断，海星和海胆的叉棘应该被视为变化了的棘。从它们个体的发育方式，从不同物种和不同属的一系列完整的逐级变化，即从简单的颗粒棘到普通棘，直到完全的三叉棘，就可以推断出来。这种逐级演变的情况，甚至涉及普通棘和具有石灰质支柱的叉棘与壳体连接的形式。在一些海星属中可以看到，恰恰是那些必要的连接说明了叉棘仅仅是变异了的分支棘。这样我们就可以知道，一种固定的棘，它长有三个距离相等的、锯齿形的、会动的分支，与其近基部处相连，在更高一些的地方，

同一个棘上还有三个会动的分支。上面的三个会动的分支如果长在一个棘的顶端，实际就构成一种简陋的三叉棘了，这种情况在长有三个较低分支的同一个棘上可以看到。毫无疑问，叉棘的钳臂与棘的会动的分支具有相同的性质。通常人们认为，普通棘是用来防御的，如果真是这样的话，那也就没有理由怀疑那些具有锯齿的且会动的分支的棘也具有相同的作用。而且如果三个分支连接在一起作为抓握或夹钳的工具，就更有用了。所以，从普通固定的棘演变到固定的叉棘，中间的每一个过渡形式都是有用的。

在有些海星属中，这种器官并不是固定地生长在不动的支柱上的，而是生长在能伸缩的长有肌肉的短柄上。除了防御之外，这样的构造可能还有其他作用。海胆类中，由固定的棘演变到连接在壳上而因此能动的棘，经历的阶段是可以弄清楚的。可惜由于篇幅有限，不能摘述更多阿加西斯先生关于叉棘发展的有意义的观察资料。按照他的说法，可以在海星的叉棘和棘皮动物另一类群，即海蛇尾类的钩刺之间，找到所有可能的中间过渡类型，而且还能在海胆类的叉棘与同一大纲海参类的锚状针骨之间发现同样的情况。

有些被称为植虫或苔藓虫的群体动物，长着一种叫鸟头体的奇怪器官。各种苔藓虫的鸟头体构造截然不同。发育最完善的鸟头体，与兀鹫的头和嘴非常相似，它们生长在颈上并且可以活动。我曾观察过一种苔藓虫，长在同一枝上的所有鸟头体，经常同时前后活动并张大下颚呈90°的角，可张开约5秒钟，并且它们的运动会促使整个群栖虫都随之发生颤动。如果拿一根针去刺它的颚，它就会牢牢地将针咬住，以至于该枝也会因此摇动。

米瓦特先生之所以以此为例，主要是因为他认为像苔藓虫的鸟头体和棘皮动物的叉棘在“本质上是相似”的器官，而且自然选择的作用很难使这类器官同时在动物界相距这样远的门类中得到发展。然而如果只对构造而言，我无法看出三叉棘和鸟头体之间的相似性。我认为鸟头体更像甲壳类的螯，而米瓦特先生也许可以适当地列举出这种相似性，甚至认为它们与鸟的头和嘴相似，作为特殊的难点。巴斯克先生、史密特博士和尼采博士都是认真研究过这一类群的博物学家，他们都认为鸟头体、单虫体以及组成植虫的虫房是同源的，虫房可以动的唇或盖，就相

当于鸟头体可以活动的下颚。但巴斯克先生并不清楚单虫体和鸟头体之间现存的任意一个过渡类型，因此无法设想通过什么有效的演变能使这个变为那个，然而我们也不能因此便认定这样的演变从未存在过。

由于甲壳类的螯在一定程度上与苔藓虫类的鸟头体相似，二者都是用作钳子，所以必须指出，甲壳类的螯至今还存在着一长系列有用的过渡类型。在最初和最简单的阶段，肢的末端闭合时会抵住宽阔的倒数第二节的方形顶部，或者抵住整个一侧，因此就能钳住碰到的物 体。但是，这肢依然是用作运动器官的。接下来我们会发现，那宽阔的倒数第二节的一边会稍微突起，有时还带有参差不齐的牙齿，末端一节闭合时便会抵住这些牙齿。随着这种突起日渐增大，它的形态以及顶节的形态都会出现微小的变异和改进，这样钳就变得越来越发达，直至最终演变成像龙虾螯一样有力的工具。以上这些过渡阶段，实际上都是可以追溯的。

除了鸟头体外，苔藓虫还有一种叫震毛的奇特器官，通常由一些能活动且容易受刺激的长刚毛组成。我曾观察过一种苔藓虫，其震毛略微弯曲，外部呈锯齿状；并且同一苔藓虫体上的所有震毛经常同时活动；因此，它们的一只像长桨一样，在我的显微镜下飞快地穿梭。假如把一只面朝下放着，震毛就会缠绕在一起，因此它们会使劲挣脱，以便分开彼此。有人设想这些震毛具有防御作用，正如巴斯克先生描述的，可以看见它们“缓慢而安静地在苔藓虫的表面擦过，当它们伸出触手时，就会擦掉有害于虫房中娇弱的栖息者的东西”。鸟头体与震毛相似，也许起着防御作用，但是它们还可以捕捉并杀死小动物。人们认为，被杀死的小动物会被水流冲到单虫体触毛所及的范围之内。有的苔藓虫物种既有鸟头体又有震毛，有的只有鸟头体，另外一小部分只有震毛。

我很难想象，还有比刚毛（即震毛）与如同鸟头的鸟头体之间外观上差别更大的两种东西。然而差不多可以肯定，它们是同源的，而且是由共同的根源，即单虫体及其虫房，发展形成的。所以我们可以理解，就如巴斯克先生所说，这些器官在某些情况下是如何慢慢地演变成另外一个样子的。膜胞苔虫属中，有几个物种的鸟头体会动的颚非常突出，并且非常像刚毛，因此只能根据上端固定的嘴确定它们鸟头体的实质。震毛也许是从虫房的唇片直接演变形成的，并没有经历过鸟头体这个阶

段。但是它们经历这一阶段的可能性应该更大，因为在演变的初期，包含单虫体虫房的其他部分不可能马上消失。在很多情况下，震毛的基部长着一个带沟的支柱，近似于固定的鸟嘴状构造，但也有些种没有这种支柱。这种关于震毛发展的观点也很有意思，因为假设所有长了鸟头体的物种都灭绝了，那么即使最有想象力的人也绝不会想到，震毛原本是一个与鸟头式类似的器官的一部分，或像形状不规则的盒子或兜帽状器官的一部分。如此迥异的两种器官竟是从同一个起源发展而来，的确很有趣。由于虫房的能活动的唇片可以保护单虫体，因此便不难相信，唇片最初是演变为鸟头体的下颚，然后转变成长刚毛，中间的所有过渡类型，同样会在不同的环境下以不同的方式起到防御作用。

在植物界，米瓦特先生仅谈到两种情况，即兰花的构造和攀缘植物的活动。关于兰花，他说："对于它们的构造起源所做的阐述，完全无法令人满意，——对于其构造初期最微小的开端的阐述很不充分，因为这些构造仅在高度发达时才有用"。由于我在另一作品中已经对此做了详尽的讨论，在此仅对兰科植物的花最显著的特点，即花粉块，稍做详细的讨论。高度发达的花粉块是由一团花粉粒聚集组成的，花粉团连接在具有弹性的柄即花粉块柄上，此柄依附在一小块极胶黏的物质上，昆虫便可以将花粉块由一朵花转移到另一朵花的柱头上去。有些兰科植物，其花粉块没有柄，花粉粒只依靠许多细丝连接在一起。但这种情况并不限于兰科植物，在此无须再探讨。但是我想讨论一下兰科植物中最低等的杓兰属，从中我们可以看到这些细丝起初大概是如何发展起来的。在其他兰科植物中，这些细丝粘黏在花粉团的一端，这就是花粉块柄最初形成的迹象。即使某些兰科植物的花粉块柄已非常长且高度发达，其花粒块柄的起源也是如此，因为在发育不完全的花粉团里偶尔还能发现埋藏于其中心的坚硬部分，这就是明显的证据。

花粉块的第二个主要特征，就是附着在柄端的那一小块黏性物质，对此可以列举出它中间的许多过渡类型都对植物有用的例子。其他目的植物，大多数花的柱头分泌的黏性物质很少。有些兰科植物分泌的黏性物质与之类似，但三个柱头只有一个分泌大量的黏性物质。该柱头也许由于分泌过盛的缘故，因此成为不育的了。当昆虫来采蜜时，就会擦到一些黏性物质，同时也会将一些花粉粒也黏走。从这种与大部分普通花

差别不大的简单情况开始，经过那些花粉团连接短的独立花粉块柄上的物种，直到那些花粉块牢固地附着在黏性物质上且柱头不育和变异很大的物种，中间存在着无数过渡类型。最后那种类型的物种，花粉块已经最高度发达和完善了。只要亲自认真观察过兰花的人，就会承认上述一系列过渡类型的存在——从仅通过一些细丝联系在一起的花粉粒且柱头和普通花差别不大的植物，到花粉块高度复杂且巧妙适应于昆虫的传粉的植物，并且也会承认那些物种中的所有过渡类型都巧妙地适应了其一般构造，以使各种昆虫能够让花朵受精。也许还能进一步研究，花的柱头是怎样变得有黏性的。对任何一类生物，我们都不了解它的整个发展史，没有办法解答这种问题，因此这个问题也毫无意义。

接下来讨论攀缘植物。从简单地缠绕一个支柱的植物开始到我所说的爬叶植物，再到有卷须的植物为止，可以排成一个很长的系列。后两类植物的茎大部分都失去了缠绕能力，但是它们保留了旋转的能力，因为卷须是有这样的能力的。从爬叶植物到有卷须的植物之间的过渡类型关系极为密切，其中有些植物甚至可以归于任意两类之一。与单纯的缠绕植物相比，爬叶植物增加了一种重要的性质，即对接触的感应性，借助这种感应性，无论是花柄或叶梗，还是由它们演变成的卷须，都会由于受到刺激就弯曲并缠绕住接触的物体。但凡看过我对该问题的相关研究论文（即攀缘植物的运动和习性）的人，我想他们都会承认，在单纯的缠绕植物和具有卷须的攀缘植物之间的过渡类型，所有功能和构造对各物种都是非常有利的。例如，缠绕植物演变为爬叶植物，显然是十分有利的；而且，长着长叶梗的缠绕植物，一旦叶梗稍微具有必需的对接触的感应性，也许就可以发展为爬叶植物。

缠绕是攀缘支柱的最简单的方式，也是攀缘植物系列中最低级的形式，因而有人自然要问：最初植物是怎么获得这种能力的，之后才能通过自然选择加以改进和增强。缠绕的能力，首先依赖于茎在幼嫩时的极度可绕性（这是许多非攀缘植物共有的一种特性）；其次依赖于茎秆按照相同顺序逐次沿着圆周各点不断弯曲。借助这种运动，茎秆才能朝着各个方向弯曲缠绕下去。茎的下部一旦碰到物体便会停止缠绕，而上部依然可以弯曲旋转，因此肯定会缠绕着支柱继续上升。许多嫩茎在初期生长之后，就会停止缠绕。在亲缘关系很远的许多不同科的植物中，某

个单独的种或属具有盘绕能力，并因此变为缠绕植物，它们必定是单独获得了这种能力，而不是从共同的祖先遗传来的。因此我可以预测，在非攀缘植物中，稍微具有这种运动倾向的植物是很常见的，这就为自然选择提供了作用和改进的基础。我做此预测时，仅能举出一个不完全的例子，那就是轻微不规则旋转的毛籽草的幼嫩花梗，非常像缠绕植物的茎，但这种习性完全没有被利用。之后不久，米勒发现了一种泽泻和一种亚麻，两者都不是攀缘植物，且在自然系统中也相隔很远，它们的嫩茎即使旋转得不规则，也是可以旋转的。而且，他说他有理由推测某些别的植物也出现过这种情况。对于那些植物，这种轻微的活动看起来并没有多少好处。至少，这些植物对我们关心的攀缘作用没有任何好处。但是我们还可以看出，假如这些植物的茎是可弯曲的，而且假如它们所处的环境有利于它们向上攀爬，那么这种轻微不规则的旋转习性就可能因此被自然选择作用增强和利用，直到它们成为非常发达的缠绕植物。

叶柄、花梗和卷须的感应性，基本上也可以用来说明缠绕植物的盘绕运动。由于许多属于不同类群的物种都具有这种感应性，因此，我们可以在许多还未成为攀缘植物的物种中看到这种性能的初始状态。事实也是如此：上述我们提到的毛籽草的幼嫩花柄，通常会朝其接触的一侧稍微弯曲。摩伦在酢浆草属的一些物种中发现，如果反复轻轻地触碰叶子和叶柄或摇动植株，叶子和叶柄就会运动，特别是被烈日曝晒之后。我反复观察过该属其他几个物种，结果同样也是如此。其中有些物种运动得很明显，这在嫩叶中看得最清晰，而在另外几个物种中却十分微弱。更重要的是，权威学者霍夫曼斯特说，所有植物的幼茎和嫩叶被摇动后，都可以运动。据我们所知，只在生长初期，攀缘植物的叶柄和卷须才是敏感的。

幼嫩的植物和正在发育中的器官，对于它们来说，因触碰或摇动而产生的微小运动，在机能上可能没有什么重要性。但是植物应对各种刺激产生的运动能力对植物本身是十分重要的，例如植物的趋光性和比较罕见的背光性以及背地性和比较罕见的向地性等。动物的神经和肌肉由于电流或士的宁（马钱子碱）的刺激而产生的运动，可以称为偶然的结果，因为神经和肌肉对这些刺激并不是特别的敏感。植物对某些刺激同样也具有运动的能力，所以它们被触碰或摇动后便会产生偶然的运动。

因此很容易就能承认，在爬叶植物和长有卷须的植物中，被自然选择作用利用和增加的就是这种倾向。但是根据我的研究报告中列举的各种理由，只有那些已经获得了旋转能力的植物才会发生这种状况，并且它们会由此逐渐演变为攀缘植物。

我已经尽我所能来解释一种普通植物是如何变为一种攀缘植物的，那就是通过不断地增强植物最初具有的轻微不规则且无用的旋转运动的倾向来实现。这种旋转运动以及因触碰或摇动而引起的运动，都是运动能力的偶然产物，而且是因为其他有利目的而被获得的。我还无法确定，在攀缘植物逐步形成的过程中，自然选择的作用是否借助了遗传效果的力量；但是我们清楚，例如植物休眠等周期性的运动却是由习性支配的。

一位练达的博物学家精心挑选了一些事例，用来证明自然选择学说不能充分解释有用构造的初期阶段，对此我已做出了足够的、也可能是过多的讨论。而且我也指出了，这一问题并没有太大的难点，这正如我希望的那样。然而，我却因此得到了一个很好的机会，使我能够稍微多叙述一些伴随机能变化的构造演变的各个阶段。而在本书的前几版中，我都没有对这个问题做过详细的讨论。现在，我简单地回顾一下上述问题。

对于长颈鹿，在那些已经灭绝的能触及高处的反刍动物中，凡是长着最长的颈和腿并且可取食比平均高度略高的树叶的个体，便可以继续生存下去；反之则会不断地被淘汰。这样一来，这种神奇的四足兽就形成了。但是所有部分的长期使用，再加上遗传的作用，必然会极大增进各部分的互相协调。我们不得不相信，拟态昆虫与某种普通物体偶然相似，在所有情况下都曾是自然选择发生作用的基石，此后偶然对这种越来越相似的细微变异的保留，才使这种拟态慢慢变得完美。只要昆虫继续发生变异，并且只要越来越完美的拟态可以帮助它们逃避目光敏锐的天敌，这种作用便会一直进行下去。某些鲸鱼物种，具有在颚上生长不规则角质小粒的趋势，这些角质小粒一开始会变成像家鹅那样的栉片状结节或齿，然后变成像家鸭那样的短形栉片，接着变成像琵琶嘴鸭那样完美的角质栉片，直到最后变成像格陵兰鲸口中那样巨大的须片。全部有利变异的保存，仿佛全都在自然选择作用的范围之中。鸭科动物的栉

片最初是被用作牙齿，然后部分被用作牙齿，部分被用作滤器，直到最后几乎完全当作滤器用了。

按照我们的判断，在上述如角质栉片或鲸须这类构造的发展中，习性和使用很少或甚至没有起作用。另一方面，比目鱼下侧的眼睛向上侧转移以及某些哺乳动物的尾巴抓握的功能的形成，基本上可以归因于长期使用以及遗传的结果。至于哺乳动物乳房的起源，最合理的推测是，最初有袋类的袋内表面布满了可分泌营养液的皮腺，自然选择作用改善了这些皮腺的功能，并且聚集在某一个区域内，就形成了乳房。要弄清楚某些古代棘皮动物用作防御的分支刺是如何通过自然选择作用变为三叉棘的也很容易；而要弄清楚甲壳动物最初仅用于运动的肢的末端一节和倒数第二节是如何通过微小的有利变异而发展成为钳的，就很困难。通过观察苔藓虫的鸟头体和震毛，我们发现外观上极不相同的器官可能是同源的，而且通过震毛，我们可以弄清楚震毛发展的各个连续阶段有什么作用。关于兰科植物的花粉块，我们可以从最初连接各花粉粒的细丝，追溯其黏合成为花粉块柄的整个过程，同样，由于普通花柱头分泌的黏性物质与附着于花粉块柄游离末端的胶黏体即便不完全一样，功能也大致相同，可以追溯出黏性物质演变到胶黏体经历的阶段。一切演化过程中的中间过渡类型对于该植物都是特别有利的。至于攀缘植物，由于刚刚讲过，我就不再复述了。

经常会有人问：既然自然选择如此有力，为什么某些物种并没有获得显然对其有利的这样或那样的构造呢？我们无法期望对这类问题有一个明确的答案，因为我们并不了解每一物种过去的历史以及现今决定它们数量和分布的因素。在大多情况下，只能给出大概的理由，但在少数情况下，却可给出具体的原因。一个物种想要适应新的生活习性，必然会发生许多对应的变异，而通常那些必要的部分却不会以恰当的方式或适当的程度发生变化。许多物种数量的增加，肯定受到了一些破坏性力量的阻碍。有些构造似乎对该物种有利，便让我们觉得它们是通过自然选择获得的，然而实际上并没有关系。在这种情况下，生存斗争并不依赖这类构造，因此这类构造就无法通过自然选择获得。很多时候，某种构造的发展需要复杂且长期的特殊条件，而这种机会非常少。通常我们认为，无论什么情况下，所有对物种有利的构造都是通过自然选择作用

而获得的，然而这是一种错误的想法，并且这种想法与我们了解的自然选择的作用方式正好相反。米瓦特先生承认自然选择对此有一些影响，但是他认为，我用自然选择的作用解释的此现象“例证还不太充分”。我们刚刚已经讨论过米瓦特先生的重要论点了，其他论点后面再讨论。依我看来，这些论点很少有例证，其分量远远比不上我主张的自然选择的力量，以及有助于自然选择作用的其他力量的论点。必须补充一点，我在此引用的事实和论点中，有一些已经在新近出版的《医学外科评论》上的一篇论文中出于相同目的被提出了。

现在，几乎所有博物学家都承认存在某种形式的进化，但米瓦特先生却认为物种是由于“内在的力量或趋势”而引起变化的。但是这种内在的力量究竟是什么，我们却一无所知。所有进化论者都认为物种具有产生变异的能力；但据我观察，除了普通变异趋势以外，似乎没有其他任何内在力量的存在。借助人工选择的帮助，普通变异趋势已经产生了许多适应性很好的家养品种，而且在自然选择的帮助下，肯定会逐渐变异产生好的自然物种。最终的状态，如同我前面所说，通常是构造的进步，但在少数情况下却是构造的退化。

米瓦特先生进一步说明新物种“是突然出现的，并且是由突然变异而产生的”。也有部分博物学家认同这一观点。例如，他假设已经灭绝的三趾马和马之间的差异是突然产生的。他认为，鸟的翅膀“除了通过明显且重要的突然变异发展起来的之外，其他任何解释都无法令人信服”。他把这一观点很明显地应用到了蝙蝠和翼手龙翅膀的形成。这就意味着进化系列中存在着巨大的断裂或不连续性，在我看来，这是完全不可能的。

如果有人相信进化是缓慢而逐步的，那他也会承认物种的变化也可能是突然且巨大的，就如同我们在自然界，甚至在家养环境下见到的各种个别的变异一样。但是由于家养环境下的物种要比它们在自然环境下更容易发生变异，因此在自然环境下，不可能经常发生像家养环境下那样巨大而突然的变异。家养环境下的变异，有些可能是因为返祖遗传。很多情况下，这些重现的性状最初也可能是慢慢获得的。还有更多的情况，一定会被称为畸形，如长了六根手指的人、体毛过多的人、安康羊和尼亚塔牛等，因为它们的性状与自然种差异巨大，因此不太可能解释本问题。除了前面所说的那些突然变异之外，剩下的少数突然变异，如

果发生在自然状态，最多只能形成与其亲种类型关系密切的可疑物种。

我不相信自然物种会像家养物种那样突然地产生变异，我也完全不信米瓦特先生所说的它们在以奇特的方式发生变化，原因如下。按照我们的经验，通常家养生物要间隔很长一段时间才会单独出现一次突然而明显的变异。如前所述，假如这类变异出现在自然环境下，由于偶然的毁灭和后来个体之间的彼此杂交，通常容易失去。这种突然变异即使是在家养环境下产生的，如果没有人为地特殊保护和隔离，同样也会失去。因此，如果新物种是以米瓦特先生所说的那种方式突然产生的，那么有不少奇特的个体，几乎会同时在同一个地区出现。但是，这和所有推理是相反的。就像人类无意识选择的情况一样，该难点只有根据逐渐进化的学说才可以避免，即通过逐渐保存那些发生了任何有利变异的大量个体，同时不断淘汰那些向相反方向变异的大量个体来实现。

毋庸置疑，许多物种都是通过极其渐变的方式进化的。许多自然大科里的物种甚至属，相互之间是如此密切地类似，以致许多物种都难以被区别。在每个大陆上，从北到南，从低地到高地，我们都会遇到大量密切近似的或者典型的物种。即使在不同的大陆上，我们也有理由认定它们之前曾是相连的，也可以看到相同的情况。但是同时我不能不讨论一下以后要提到的问题。观察一下远离大陆周围的岛屿上的生物，有多少能上升到可疑种的地位呢？如果我们考察过去的物种，而把某地区刚刚消失的物种与现存物种相比较，或者把埋存于相同地质层不同亚层中的化石物种相比较，就会发现情况也是如此。很明显的是，许多化石物种与现存物种或近期灭绝的物种之间，关系是非常密切的，因此不能说这些物种是突然产生的。同时还应牢记，如果我们观察近缘物种，而不是明显的不同物种时，就会发现无数极细微的过渡型构造，它们可以将完全不同的构造彼此联系起来。

许多事实只有通过物种逐渐细微进化的原理才可以解释。例如，大属内物种之间的相互关系比小属内的更密切，而且变种数量也更多。大属内的物种又可聚集为许多小群，就像变种围绕着物种一样。还有其他一些类似于变种的情况，我在第二章做过说明了。同样，根据这个原理我们能够了解，为什么种的性状比属的性状更容易发生变异，为什么以异常的程度或方式发展起来的构造比该物种其余的构造更容易发生变

异。关于这方面的类似例子，我还可以举出很多。

即使产生很多物种经历的步骤，不比产生那些区别细微的变种经历的步骤多，还是可以认为，有些物种是通过不同的和突然的方式发展起来的。不过想要证实这一点，还需要提供有力的证据。赖特先生列举的那些模糊且在某些方面存在错误的类比，想借以说明突然进化的观点，比如无机物质的突然结晶或存在小面的球体上的一个小面落到另一小面等，基本上毫无讨论的价值。但是有一类事实，比如在地层内突然有新的明显不同的生命形式被发现，乍一看好像可以支持突然产生的观点，但是这种证据的价值，取决于地球史远古时代的地质记录是否完整。假如地质记录像许多地质学者所说的那样，是不完整的，那么新类型仿佛是突然形成的说法便不足为奇了。

假如我们否认生物演变是像米瓦特先生所说的那样巨大，比如鸟类或蝙蝠的翅膀是突然产生的，或三趾马是突然变成普通马的，那么对于地层内相连环节的不足，突然变异的观点提供不了任何解释。胚胎学却对这种突然变化的观点提出了强有力的反对。大家都知道，在胚胎初期，鸟和蝙蝠的翅膀，马或其他四足兽的腿，并没有什么区别，之后它们经过不可察觉的细微步骤而产生了分化。后面我们还会谈到，所有胚胎学上的相似性都是因为，现存物种的祖先在幼年期之后才产生变异，而后才将它们新获得的性状在相应年龄传递给它们的后代。所以，胚胎几乎不受影响，而且这可以作为该物种过去存在情形的记录。因此，在胚胎发育的早期阶段，现存物种通常与古代同一纲且已灭绝的生物类型很相似。根据这种胚胎相似的观点，我们无法相信动物会经历上述那样巨大且突然的转变；何况在胚胎状态下，找不到任何突然变异的痕迹；而其构造上的各个细微变化，都是经过无法察觉的微小步骤逐渐发展起来的。

假如有人相信某种古代生物是通过一种内在的力量或倾向而突然转变成的，例如有翅膀的动物，那么，他必须违反所有推理，假设许多个体都是同时产生变异的。他也无法否认，这类构造上突然而巨大的变化与大部分物种产生的变化极不相同；他还必须承认，为了适应生物本身所有其他部分以及周围的环境，许多完美的构造是突然产生的。那么，他将无法解释这种复杂而奇特的相互适应。他还得假设，这些巨大而突

然的转变并没有在胚胎上留下丝毫痕迹。依我看来，这些假设完全只能说是奇迹，都已经超出了科学的领域。

第八章：本能

本能与习性的起源不同

许多本能如此奇妙，这对于许多读者来说，它们的发生可能足以推翻我的整个理论。在此我必须声明，我不打算探讨智力的起源，正如我没有探讨过生命本身的起源一样。我们只关注同纲动物的本能和其他精神能力的多样性。

我不会试图给本能下什么定义。很显然，该名词通常包含若干不一样的智力行为。如果我们谈到本能驱使杜鹃迁徙，并把蛋产在其他鸟的巢内时，谁都能明白这是什么含义。通常人类需要经验才能完成某些活动，而当一种动物，特别是毫无经验的年幼动物，在不清楚目的的情况下却可以按照相同方式去完成时，就被称为本能。但我能够证明，这些性状都不具有普遍性。就像休伯说的，即使是自然系统中的低等动物，少许推理和判断常常也会产生作用。

弗·居维叶和一些较老的形而上学者，曾对本能和习性做出了比较。我认为，这种比较对于执行本能动作的心理状态给出了非常准确的看法，但并没有涉及其起源。我们在不知不觉中做出了许多习惯性行为，实际上有很多行为是与我们的意志直接相反的！可是它们却可能由于意愿或者理性而被改变。习性容易与其他习性在一定时间段和身体状态相关联。习性一旦获得，通常在整个生命中保持不变。我们还可以指出本能和习性之间的其他相似点。就像重复唱一首著名的歌曲一样，也是出于本能，按照一定的节奏，一个动作跟随着另一个动作。如果一个人唱歌时或者死记硬背任何东西时被打断，他通常会被迫从头开始，以恢复惯常的思维方式。休伯发现一种毛毛虫也是如此，它可以搭建一种非常复杂的茧床。如果他把一只已经完成了茧床第六阶段的毛毛虫，放到只完成第三阶段的吊床上，那只毛毛虫就会轻松地完成第四、第五和第六阶段的建造。但是，如果将一条刚完成第三阶段的毛毛虫从茧床中取出，并放入已经到第六阶段的茧床中，由于大部分工作已经完成了，它

并未因此得到任何好处，这让它感到很困惑，为了完成吊床，它似乎不得不从第三阶段开始，试图去完成已经完成的工作。

如果我们假设任何习惯性行为会遗传（我认为可以证明这种情况有时确实会发生），那么一种习惯与一种本能之间的本来相似性就会变得如此接近，以至于无法区分。如果说莫扎特在三岁那年不是只练习了一点钢琴便会弹奏，而是完全没有练习过就能演奏一首曲子，那他也许真的可以说是出于本能了。但是，如果假设通过习性使某一代人获得了大量的本能，然后又通过遗传传给了后代，那将是最严重的错误。可以清楚地证明，我们了解的最奇妙的本能，即蜜蜂和许多蚂蚁的本能，不可能因此获得。

人们普遍承认，在每个物种目前的生存条件下，它们的本能对于它们的生存而言，与肉体构造同等重要。在生存条件变化的情况下，对本能进行轻微的改变至少可能对物种是有利的；如果可以证明本能确实可以变异，无论变化多么微小，那么我认为在自然选择中保存并不断积累本能的变异，直到任何有益的程度都没有难度。因此，正如我相信的，所有最复杂、最奇妙的本能都是这样产生的。由于身体结构的变异是由使用或习性引起和增强的，并且由不使用而减少或丢失的，因此我毫不怀疑本能也是这样。但是我相信，相对于自然选择对所谓本能的自发变异的影响来说，习性的影响是次要的。相同地，本能的自发变异是由未知原因产生的，就如同身体结构上出现的细微差别一样。

通过自然选择不可能产生复杂的本能，除非缓慢而逐步地积累了许多微小但有利可图的变异。因此，就像身体构造的情况一样，我们应该无法在自然界中找到每种复杂本能的实际过渡类型（只能在每个物种的直系祖先中找到这些过渡类型），但我们应该能在旁系中找到一些证据；或者我们至少应该能够证明某种过渡类型的存在是可能的；我们当然可以做到。考虑到除了欧洲和北美以外，几乎没有观察过动物的本能，并且对于已灭绝物种更是一无所知，导致最复杂的本能的中间类型能够大量地被发现，这让我感到非常惊讶。同一物种有时在不同的生命周期，一年中的不同季节或处于不同环境下时具有不同的本能，这种情况有时会促进本能的变异。在这种情况下，某些本能可能会通过自然选择得以保留。而且，很多实例可以证明，自然界存在同一物种中本能多

样性的这种情况。

就像身体构造那样，每种物种的本能都对物种本身有利，但据我们判断，并且按照我的理论，它从来没有专门为其他物种的利益而产生过。一种动物显然是为另一种动物的唯一利益而采取行动的最强实例，首先便是由休伯观察到的，蚜虫是自愿向蚂蚁分泌甜味物质。以下事实表明，它们是自愿这样做的。我从酸模植物上的大约12只蚜虫中捉走了所有的蚂蚁，并在几个小时内阻止了蚂蚁出现。经过这段时间后，我确信蚜虫要排泄了，我用放大镜观察了一段时间，但发现没有蚜虫排泄。然后我模拟蚂蚁用触角触摸它们，尽我所能地用一根头发轻轻地抚摸它们，但蚜虫依然没有排泄。之后，我让一只蚂蚁接近了这些蚜虫，然后，通过蚂蚁急切的奔跑推测，它似乎立即意识到自己发现了一笔巨大的财富。这只蚂蚁开始用触角拨弄一个蚜虫的腹部，然后又转移到另一个蚜虫边。蚜虫一感觉到触角，便立即举起腹部，排出一滴清澈的甜汁，蚂蚁便急切地吞下了甜汁。甚至很年轻的蚜虫都表现出这种方式，这表明该动作是本能的，而不是经验的结果。根据休伯的观察，蚜虫对蚂蚁肯定是不嫌恶的。即使没有蚂蚁在场，蚜虫最终也必须排出它们的分泌物。但是，由于分泌物的黏稠度极高，所以很难将其清除。因此，蚜虫可能并不是出于蚂蚁的利益而分泌甜汁。尽管我不相信世界上任何一种动物的某种行为是专门为了另一物种，但是每种动物都试图利用其他动物的本能，就像利用了其他动物较弱的身体构造一样。同样，在某些情况下，某些本能不能被认为是绝对完美的。但是这一点和其他类似要点并不是必不可少的，因此不必做详尽的分析。

由于自然状态下本能可以发生某种程度的变异，以及这种变异的遗传对于自然选择的作用是必不可少的，因此应该给出尽可能多的实例；但是受篇幅所限，无法一一列举出来。我只能断言，本能的确会发生变化，例如，迁徙本能在范围和方向上可能发生变化，甚至可能全部丧失。鸟类的巢穴也是如此，鸟类的巢穴部分随选择的位置、栖息地的自然环境和气候而变化，但通常是我们完全不知道的原因引起的。奥杜邦给出了几个关于美国南北部几种巢穴差异的杰出案例。曾有人有这样的疑问：既然本能是可变的，那么为什么“在蜡质缺乏时，蜂没有获得使用别的材料的能力呢？”可是蜂又能使用什么别的自然材料呢？我曾经见过

它们用混合朱砂而变硬的蜡或混合猪油而变软的蜡来工作。奈特曾发现，他的蜜蜂并不积极采集树蜡，而是取用去皮树木上的一种蜡和松脂的黏结物。最近还有人说，蜜蜂不去采集花粉，而喜欢使用一种叫燕麦粉的物质。惧怕任何天敌无疑是一种本能，就像在雏鸟中看到的那样，通过经验和其他动物对天敌的恐惧感会增强这种本能。但是，正如我在其他地方指出的，栖息在荒岛上的各种动物对人类的恐惧是逐渐形成的。而且，甚至在英国，我们可能会看到这样的例子，就是所有大型鸟类对人类的恐惧都比小型鸟类更大，因为大鸟受到人类的迫害最大。我们可以肯定地将大鸟更怕人归于这个原因。因为在无人居住的岛屿上，大鸟并不比小鸟更怕人。在英国，喜鹊对人很警惕，但在挪威正好相反，就像小嘴乌鸦在埃及一样。

可以通过多种事实证明，自然状态下出生的同一物种的不同个体的精神性能极为多样化。在某些物种中也可能出现一些偶然和奇特的习性，如果对物种有利，则可能通过自然选择而产生新的本能。但我很清楚，这些一般性陈述如果没有详细事实加以证明，只会对读者产生微弱的影响。 我只能再次保证，我不会说缺乏可靠证据的话。

家养动物的习性和本能的遗传变异

通过简单地考虑家养状况下的一些案例，将增强对自然状态下的本能发生遗传变异的认识。因此，我们还能够看到，习性以及自发变异的选择在改变家养动物的精神性能方面发挥了作用。众所周知，家养动物的精神性能变化是非常大的，例如猫，有的天生就是抓大老鼠的，有的天生就是抓小老鼠的，而且我们清楚这种特性是遗传的。据圣约翰说，有一只猫经常抓鸟回家，另一只则会捕捉野兔或家兔，还有一只却在沼泽地捕猎，基本上每夜都要捕捉丘鹬和沙锥。许多奇怪而真实的例子都可以说明某些心境或时间段相关的各种性格、品味以及怪癖都是可以继承的。但是，让我们看一下几种我熟悉的狗的情况。毫无疑问，年幼的指示犬（我也曾亲眼见过这样惊人的例子）第一次被带出去时，有时会引导甚至帮助其他的狗。寻回犬在某种程度上会遗传寻回的特性，而且牧羊犬倾向于围着羊群奔跑，而不是奔向羊群的特性也会遗传。我不明白为什么这些行为是幼犬在没有经验的情况下进行的，并且每个幼犬几

乎会使用相同的方式，每个品种都渴望并乐于完成这样的行为，尽管它们并不知道最终目的，年幼的指示犬不知道它这样做可以帮助主人，就像菜白蝶不知道为什么它把卵产在甘蓝的叶子上，我看不出这些行为在本质上与真正的本能有什么不同。如果我们看到一种狼，它年幼时未经任何训练，一闻到猎物就站起来，像雕像一样一动不动，然后以奇特的步态缓慢地向前爬；还有另一种狼环绕追逐鹿群，而不是直接冲向鹿群，并将它们驱赶到很远的地方，我们当然应该将这些行为称为本能。家养状态下的本能，肯定不像自然本能那样稳定不变，因为对它们的选择不那么严格，并且是在不那么固定的生存条件下、在非常短的时间内遗传下来的。

当不同品种的狗杂交时，这些家养条件下的本能、习性和性格的遗传程度如何，以及它们如何奇妙地融合在一起，就可以很好地显示出来。因此，众所周知，与斗牛犬的杂交已经影响了许多世代的灵缇的勇气和顽强性。牧羊犬与灵缇的杂交使整个后代都有捕猎野兔的倾向。这些家养条件下的本能经过杂交实验后，就类似于自然本能，它们以类似方式奇妙地融合在一起，并在很长一段时间内表现出父母双方本能的痕迹。例如，勒罗伊描述了一只狗，其曾祖父是狼，而这只狗只以一种方式表现出其野生血统的痕迹，即被召唤时并没有以直线走向主人。

有些人认为家养下的本能仅遗传自长期且强制的习惯性行为，我认为这是不正确的。没有人想去教或者可能教过翻飞鸽翻飞，就像我目睹的那样，从未见过翻飞的幼鸽也可以翻飞。我们可能会相信，有些鸽子对这种奇特的习惯表现出轻微的倾向，并且连续不断地选择连续几代的最佳个体，就使翻飞鸽变成了现在的样子。正如我从布伦特先生那里听到的一样，在格拉斯哥附近有一种家养的翻飞鸽，如果不倒过来飞，就不能飞0.46米（18英寸）高。如果没有一只狗表现出指示猎物倾向的话，我们可能就会怀疑，是否有人会训练一只狗来指示猎物的方向；正如我曾经在纯种梗犬中看到的那样，偶尔会发生这种情况。初期的指示倾向一旦出现，就可以有条不紊地进行选择，并在每一代后继者中强制训练遗传效果，这种指示犬很快就会被培养出来。在每个人都试图获得最善于指示和捕猎的狗，而不打算改良品种的过程中，无意识的选择仍在起作用。另一方面，在某些情况下，仅习性一个因素就足够了。没有

动物比幼小的野兔更难驯化了；也几乎没有动物比幼小的家兔更易驯服了。但我不认为曾经对家兔进行选择是为了让其容易驯服。我们必须将从极端荒野到极端驯服的全部遗传变异，大部分归因于习惯和长期持续的圈养。

驯化会失去自然的本能：在那些很少或永远不会孵卵（也就是根本不想卧在它们的蛋上）的家禽中看到了一个明显的例子。仅仅因为太熟悉，就让我们无法看到家养动物曾经历了多么巨大和持久的心理变迁。几乎不可能怀疑狗对人的爱已成为狗的本能。即使被驯服后，所有的狼、狐狸、豺和猫属物种仍喜欢攻击家禽、羊和猪；并且这种倾向已经被发现是无法矫正的，这些动物是在年幼时从火地岛和澳大利亚等地区被带回家的，这些地区的土著人没有饲养这些家养动物。另一方面，即使被驯化的狗还很小，也很少被教导不要攻击家禽、羊和猪！毫无疑问，它们偶尔也会发起攻击，然后就会遭到殴打；如果不改正，就会被处死； 因此，通过某种程度的选择，这种习性可能已经通过遗传使我们的狗变得文明化了。另一方面，幼鸡完全由于习惯而失去了对狗和猫的恐惧的本能，毫无疑问，这种本能是天生的。赫顿告诉我，一只被家鸡抚养的原鸡（印度野生鸡）的雏鸡，最初野性很大。在英国，由母鸡抚养的小雉鸡也是这样，并不是说小家鸡失去了所有的恐惧，而只是不怕猫和狗，因为如果母鸡发出危险的警告声，它们会从母鸡的翅膀下逃走（尤其是年轻的火鸡），并藏在周围的草丛或灌木丛中；显然，这样做是出于本能，正如我们在野生地面鸟类中看到的那样，目的是为了让它们的母亲飞走。但是，在驯养过程中，我们的鸡保留的这种本能就变得无用了，由于不使用，母鸡的飞行能力几乎已经消失了。

因此，我们可以得出这样的结论，在家养环境下，动物可能会获得一些新的本能，而自然本能已经部分由于习性而丧失，部分由于人类在连续几代家养个体中选择和积累了特殊的心理习性和行为而丧失，这些情况刚刚出现时，我们常常无知地认为是一种意外。在某些情况下，仅强制性习惯就足以产生这种遗传的心理改变；在其他情况下，强制性习惯却无所作为，一切都是有条不紊和无意识地选择的结果；但在大多数情况下，习性和选择可能会共同起作用。

特殊本能

通过分析一些情况，也许我们能最好地理解自然状态下的本能是如何通过选择而改变的。在接下来的内容中，我将只讨论其中三个，即本能使杜鹃将卵产在其他鸟巢中、某些蚂蚁的养奴本能以及蜜蜂的筑巢本能，后两种本能通常被博物学家称作是所有已知本能中最奇妙的。

杜鹃的本能 现在普遍认为，杜鹃的本能的更直接和最终原因是，它不是每天产蛋，而是每隔两三天下一次蛋；因此，如果它要自己筑巢并孵卵，那么刚下蛋的卵就必须放置一段时间，否则在同一巢中会有不同年龄的卵和雏鸟。如果是这样的话，产卵和孵化的过程可能会很不方便，特别是雌鸟必须在很早的时间进行迁徙；而最初孵出的雏鸟可能仅由雄性来喂养。但是美国杜鹃正处在这种困境中：因为雌鸟自己筑巢，产卵并孵育雏鸟。有人声称，美国杜鹃偶尔会在其他鸟的巢中产卵，这种说法有人认可也有人反对。但是，我最近听艾奥瓦州的梅丽尔博士说，有一次他在伊利诺伊州看到，一只小杜鹃与一只小松鸦一起栖息在蓝松鸦的巢内，而且由于这两只小鸟的羽毛都已经长齐了，绝对不会认错。不过，我可以举几个不同种类的鸟的实例，这些鸟偶尔会在其他鸟的巢中产卵。现在让我们假设，欧洲杜鹃的古老祖先具有美国杜鹃的习惯，偶尔也会在别的鸟巢里产卵。如果老鸟偶尔通过这种习性而获利，或者如果幼鸟由于误用了另一只雌鸟的母性本能而使它们比由自己的母亲照料更强壮，因为雌鸟必须同时产卵和照顾不同年龄段的幼鸟，那么雌鸟和被误养的幼鸟将获得优势。这会让我相信，这样养育的幼鸟很容易遗传其母亲的偶发异常习性，进而又倾向于在其他鸟巢中产卵，从而使它们孵育幼鸟更容易获得成功。通过这种自然的持续过程，我相信杜鹃的奇特本能可能已经产生。最近，米勒用充分的证据证明了，杜鹃有时也会把卵产在空地上并在那里孵卵和哺育雏鸟。这种罕见的情况可能是早已丧失的原始筑巢本能的重现。

有人反对说，我没有注意到杜鹃的其他有关本能和构造的适应性，他们认为二者必然是相互关联的。但是在所有的情况下，只通过一个单独的物种去推测一种已知的本能是毫无用处的，因为到目前为止还没有任何事实可以提供。直到现在我们知道的，也只有欧洲杜鹃和非寄生的

美洲杜鹃的本能。目前，根据拉姆齐先生的观察，我们了解有关三种澳洲杜鹃的一些状况，这三种杜鹃也会在其他鸟类的巢内产卵。有关杜鹃这种本能的要点有三个：第一，除了极少个体之外，普通杜鹃都只在一个巢中产一个蛋，这样一来，硕大而贪吃的幼鸟就可以获得充足的食物；第二，其蛋相当小，甚至比不上云雀的蛋，而云雀仅有杜鹃1/4大。我们通过非寄生的美国杜鹃所产的巨大的蛋可以推测，蛋小的确是一种适应性特征；第三，小杜鹃孵出后不久，便具有将巢内其他雏鸟挤出巢外的本能和力量，以及正好合适的背部形状，致使其他小鸟冻饿而死，这曾被称为仁慈的安排。因为这样既能让小杜鹃得到足够的食物，又可以使其他小鸟在尚未有感觉之前便无痛苦地死去!

现在看看澳洲杜鹃，通常它在一个巢内只产一枚蛋，但也有在相同巢中产两至三枚蛋的。古铜色杜鹃蛋的大小差异很大，长度从27毫米（8英分）到33毫米（10英分）不等。为了欺骗代养雌鸟，或者更大可能是让孵化期缩短（据说蛋的大小和孵化期的长短是正相关的），如果产的卵比现在还小，对该物种就会更有利，因为小个的蛋可以更安全、更保险地孵化和养育出来。拉姆齐先生说，有两种澳洲杜鹃，如果它们在没有遮盖的巢里产蛋时，特别喜欢挑选那些蛋的颜色与自己的类似的鸟巢。欧洲的杜鹃明显表现了一些与此本能类似的倾向，但也有一些与众不同，它的蛋是暗灰色的，但是会把蛋产在具有鲜蓝绿色卵的篱莺巢内。如果欧洲杜鹃一成不变地表现出上述本能，那么在全部那些假设一起获得的本能中，肯定还应加上这一种本能。据拉姆齐先生讲，澳洲古铜色杜鹃的蛋在颜色上有极大的变化，所以自然选择也会像对蛋的大小一样，把任何在蛋的颜色上有利的变异保存和稳固下来。

至于欧洲杜鹃，在破壳后3天内，养父母自己的雏鸟一般都被挤出巢外；因为小杜鹃这时还是相当无力的状态，所以古尔德先生以前认为，是养父母将其雏鸟驱逐出去的。但是，他现在已得到了真实的记录，确实有人看见，一只小杜鹃在眼睛还没有睁开，甚至连头都抬不起来时，就可以把它的义兄弟挤出巢外了。观察者把被挤出的一只雏鸟放回巢中，结果又被挤出来了。至于获得这种奇怪而可恨本能的方式，假如对于刚出生的小杜鹃尽可能快且多地获得食物具有非常重要的作用（可能确实是这样），那么我想，杜鹃在连续数代中慢慢获得了为排挤

能力所需的盲目欲望、力量和构造，这并不是一件难事。因为具有这种最发达的习性和构造的小杜鹃，就会得到最好的孵育。最初，这种特殊本能可能来自年龄和力气稍大一些的雏鸟不经意的乱动，后来这种习性得到了改进，并遗传给了年龄更小的后代雏鸟。我认为这种本能的获得与其他鸟类的幼鸟在出壳前获得破壳的本能同样困难，或者像欧文说的那样，幼蛇为了破壳，上颚临时的锐齿更难获得。假如在所有年龄段身体的每个部分都容易产生单独的变异，并且这些变异倾向于在相应的或更早的年龄段被遗传——这是无可争议的观点——那么幼体的本能和构造，的确与成体的一样，可以慢慢地发生变化，这两种情况必然与自然选择的一切学说共存亡。

牛鸟属是美洲鸟类中很特别的一属，和欧洲的椋鸟类似，其中有些物种也像杜鹃一样具有寄生的习性，并且它们在完善本能的过程中表现出了有趣的级进。杰出的观察家赫德森先生说，褐牛鸟的雌鸟和雄鸟，有时群居在一起，有时和自己的配偶一起生活。它们要么自己筑巢，要么强占别的鸟类的巢，偶尔还会将其他鸟类的雏鸟抛出巢外。它们要么在占据的巢内产蛋，要么很奇怪地在此巢的顶上为自己再造一个巢，它们通常自己孵育卵和雏鸟。但根据赫德森先生说，它们偶尔也可能会寄生，因为他曾见到该物种的幼鸟追着不同种的老鸟，鸣叫着要老鸟喂食。牛鸟属的另外一个物种——多卵牛鸟，寄生习性比上述牛鸟更发达，但依然不完善。据了解，这种鸟一定会在别的鸟巢里产蛋。但令人注意的是，这种鸟有时会数只鸟共筑一个既不规则又不干净的巢，巢的位置选得很不合适，例如在大蓟的叶子上。但是赫德森先生认为，它们从来不会把自己的巢筑好。它们常常在别的鸟的巢内产15至20枚蛋，所以可能很少或根本没有蛋可以孵化出来。另外，它们还有在蛋上啄孔的奇怪习性，无管是自己产的还是强占的巢中的蛋，它们都会啄。它们将大量的蛋随意下在空地上，因此就被丢弃了。第三个物种，北美洲的单卵牛鸟，已经获得如杜鹃一般完美的本能，因为它们从不在寄养的巢内产一个以上的蛋，所以就能确保幼鸟得到很好的哺育。赫德森先生坚决不相信进化论，但是他看了多卵牛鸟的不完全的本能，似乎也受到了触动，于是便引用了我的话，并问：“是否我们必须得认为这些习性，不是天赋的或特别创造的本能，而是一种普遍的法则即过渡形成的微小结果呢？”

如上所述，有许多鸟会在其他种类的鸟巢中产蛋，这种习性在鸡科并不罕见，并且有助于阐明鸵鸟奇特的本能。几只母鸵鸟会先一起在一个巢中产下几枚蛋，然后再在另一个巢中产下几枚蛋，通常这些蛋都是由雄性孵化的。雌鸵鸟产下大量蛋的事实可能解释了这种本能；但是，就像杜鹃一样，雌鸵鸟每两三天才产一次蛋。然而，美洲鸵鸟的本能尚未完善，因此在平地上撒满了数量惊人的鸵鸟蛋，所以在一天的狩猎中，我捡了不少于20个蛋，它们都是被丢弃和浪费的。

许多蜂是寄生的，总是将卵产在其他种类的蜂巢中。这种情况比杜鹃更引人注目；因为这些蜂不仅具有本能，而且根据其寄生习性改变了构造；因为它们没有花粉收集器官，而这种器官是它们为幼蜂储存食物必需的。同样，某些泥蜂科物种（类黄蜂昆虫）也寄生在其他物种上。法布尔最近给出了令人信服的理由，他说，尽管小唇沙蜂一般会自己制造巢穴并将猎物储存起来供幼虫食用，但是当这种昆虫发现一个泥蜂已经筑好并储存了食物的洞穴时，它会加以利用，临时在此处寄生。在这种情况下，就像牛鸟和杜鹃一样，如果对物种有利，并且被侵占巢穴的物种也不会因此而灭绝，自然选择会使偶尔的习性永久化，这一点很容易理解。

养奴本能 这种非凡的本能是休伯在红蚁中首次发现的，休伯作为观察家，比他的父亲更为出色。这个蚂蚁绝对依赖于它的奴隶；如果没有奴隶的帮助，该物种肯定会在一年内灭绝。雄蚁和可育雌蚁都不工作，工蚁或不育雌蚁尽管捕捉奴隶很有勇气和活力，但是并不会做其他工作。它们没有能力自己筑巢或喂养幼虫。当发现旧巢不方便并且必须迁徙时，是由奴隶决定迁徙，并实际上由奴隶将主人衔在嘴里带走。主人们是如此的无能，以至于当休伯在没有奴隶的情况下把其中的30只蚂蚁关在一起时，尽管给它们提供了大量的食物，并用幼虫和蛹来刺激它们工作，它们也什么都不做。它们甚至无法养活自己，许多蚂蚁因此饿死。然后，休伯放进去了一个奴隶即黑蚁，它立即着手工作，喂养并拯救了幸存者；黑蚁造出一些蚁房，抚养幼虫，然后将一切都整理得井井有条。有什么比这些已经确定的事实更加非同寻常的呢？如果我们不知道任何其他蓄养奴隶的蚂蚁，那么要推测这种本能是如何发展完善的将变得非常困难。

血蚁同样是由休伯首次发现的会蓄养奴隶的蚂蚁。该物种在英格兰南部被发现，大英博物馆的史密斯先生已经注意到了它的习性，我非常感谢他提供有关此问题和其他问题的资料。尽管我完全信任休伯和史密斯先生的资料，但还是试图以一种怀疑的心态来对待这个问题，因为任何人都可能会怀疑这种非同寻常和可恶的养奴本能。因此，我将详细介绍自己所做的观察。我打开了血蚁的14个巢穴，发现所有的巢穴都有几个奴隶。奴隶物种的雄性和可育雌性仅在它们自己的固有社群中被发现，从未在血蚁的巢中被发现过。奴隶是黑色的，并且体型不超过其红色主人的一半，因此外观上的差异非常大。当巢穴受到轻微干扰时，奴隶偶尔会出来，就像它们的主人一样烦躁不安，并捍卫巢穴；当巢穴受到极大干扰并且幼虫和卵暴露在外时，奴隶们会与主人一起积极地工作，将其带到安全的地方。因此，很明显，奴隶们感到像在自己家里一样舒适自如。在连续三年的六七月中，我曾在萨里郡和萨塞克斯郡对着数个巢穴观察了好几个小时，但从未见过奴隶离开或进入巢穴。因为在这几个月中，奴隶的数量很少，所以我认为奴隶数量更多时，它们的行为可能会有所不同。但是史密斯先生告诉我，他在5月、6月和8月的各个时段，都在萨里郡和汉普郡观察过这些巢穴，但是从未见过奴隶出入巢穴，尽管在8月有大量奴隶存在。因此，他认为黑蚁是严格的家庭奴隶。另一方面，可以经常看到主人往巢穴里带入材料和各种食物。但是，在1860年7月，我遇到了一个蚁群，那里有大量的奴隶，而且我看到一些奴隶与主人混在一起，离开巢穴沿着同一条路朝约22.8米（25码）远的一株高高的苏格兰冷杉行进，并一起往树上爬，可能是为了寻找蚜虫或胭脂虫。据曾做过大量观察的休伯说，在瑞士，奴隶习惯于与主人一起筑巢，并且独自在早晚开放门户。正如休伯明确指出的那样，它们的主要任务是寻找蚜虫。在两个国度的蚁群中，主人和奴隶的普通习性出现如此差异，可能仅仅因为在瑞士捕捉到的比在英国捕捉到的奴隶更多吧。

有一天，我有幸见证了血蚁从一个巢穴到另一个巢穴的迁移，这是一个最有趣的景象，可以看到主人小心翼翼地将奴隶衔在自己的下颚中，这一点和红蚁很不同。另一天，大约有20名血蚁在同一地点出没，显然不是在寻找食物，这引起了我的注意。它们慢慢接近奴隶物种（黑蚁）的一个独立社群，但是遭到激烈抵御。有时，好几只血蚁紧紧拉着

黑蚁的腿。血蚁残酷地杀死了它们的小对手，把尸体当作食物送往了大约26.5米（29码）远的巢穴，但是它们想抢夺黑蚁的蛹来培育成奴隶的计划却失败了。然后，我从另一个巢穴中挖出一小团黑蚁蛹，并将其放到战斗地点附近的空地上。血蚁很急切地抓住了黑蚁蛹，并把它们带走了，也许在幻想它们最终在战斗中胜利了。

同时，我在同一地方放了一小包另一个物种黄蚁的蛹，其中一些黄色小蚂蚁仍紧贴着巢穴的碎片。正如史密斯先生描述的那样，有时黄蚁也会被当成奴隶，尽管这种情况很少出现。黄蚁的体型很小，但它非常勇敢，而且我曾经看到它猛烈地攻击其他蚂蚁。在一个实例中，令我惊讶的是，在血蚁巢穴下面，我找到了一个独立的黄蚁群的巢穴，当我不小心扰动了这两个巢穴时，小黄蚁以惊人的勇气袭击了它们的大邻居。我很想知道血蚁是否能将它们习惯性当成奴隶的黑蚁，和那些很少被捕获的勇敢的小黄蚁区分开来。不过很明显的是，它们立即就能将二者区分开，因为我曾经看到血蚁急切地抓住遇到的黑蚁蛹，但是当它们碰到黄蚁的蛹或者黄蚁巢中的泥土时，都会立刻跑掉。在大约一刻钟之后，等所有的小黄蚁都离开之后，它们才振作起来并带走了蛹。

一天晚上，我观察了另一个血蚁群，发现许多这些蚂蚁进入巢穴时携带了许多黑蚁的尸体（这说明它们正在归巢而不是迁移）和蛹。我逆向追踪了带着战利品的蚁群，在大约四十码远的地方，一个石楠丛莽下，我看到了最后一只衔着蚁蛹出现的血蚁，但我无法在厚厚的石楠丛中找到被破坏的蚁穴。然而，这个巢穴必然近在咫尺，因为有两三只黑蚁在慌乱中奔涌出来，有一只蚁还衔着蚁蛹静静地停在石楠的小枝顶上，对巢穴被毁灭表现出了某种绝望的神情。

就蓄养奴隶的奇妙本能而言，这些都是事实，不需要我多加证明。这些事实让我们了解了，血蚁的本能习性与红蚁的本能习性形成了鲜明的对比。红蚁不会建立自己的巢穴，不能决定自己的迁徙，不为自己或幼蚁收集食物，甚至不能养活自己，这一切绝对依赖其众多奴隶。另一方面，血蚁拥有的奴隶数量要少得多，而且在夏季的初期，奴隶数量会更少。主人决定在何时何地建造新的巢，主人在迁移时会携带奴隶。在瑞士和英国，奴隶似乎都专门照顾幼虫，只有主人独自外出抢夺奴隶。在瑞士，奴隶和主人共同工作，筑巢和搬运材料；主奴一起照顾蚜虫，

并且都会为蚁群收集食物。在英国，主人通常独自离开巢穴，为自己、奴隶和幼虫收集建筑材料和食物。因此与瑞士相比，英国的主人从奴隶那里得到的服务要少得多。

我不会妄加猜测血蚁的这种本能是通过什么步骤来形成的。但是，正如我所见，由于不是蓄养奴隶的蚂蚁，如果有些蛹散布在它们的巢穴附近，它们也会带走蚁蛹，那么原本作为食物储存的蚁蛹可能会发育；这样，无意中被养育的蚂蚁便会遵循自己的本能，并尽其所能工作。如果事实证明它们的存在对抓捕它们的物种有用，如果对捕获该物种的工蚁比繁殖工蚁更有利于该物种，那么就可以通过自然选择来加强最初为食物而采集蚁蛹的习性，并转变为完全不同且永久化蓄养奴隶的目的。一旦获得了这种本能，即使其作用甚至比英国血蚁要少得多，正如我们已经看到的那样，英国血蚁来自奴隶的帮助比瑞士的同类要少，自然选择也会增加并改变这种本能。如果总是假设每种变异都对物种有用的话，自然选择就会让这种本能一直加强，直到像红蚁一样完全依赖于其奴隶。

蜜蜂筑巢的本能 在这里，我不准备详细讨论该问题，而只是概述我得出的结论。除非是一个愚钝的人，否则只要看到了蜂巢的精美结构能够如此巧妙地适应它的目的，无不引起强烈的钦佩！我们从数学家那里获悉，蜜蜂实际上已经解决了一个深奥的问题，它们所造的蜂房形状合适，可以容纳尽可能多的蜂蜜，而在建造时消耗的蜂蜡最少。有人指出，即使熟练的工人用最合适的工具和计算器，也很难制造出真正形状的蜂房，尽管这完全是由一群在黑暗的蜂巢中工作的蜜蜂建造的。不管出于何种本能，乍一看，似乎很难想象蜜蜂们是如何制作所有必要的角度和平面的，甚至无法感知蜂房的制作是否正确。但是难度可能并不像刚开始那么大，我认为，可以通过一些非常简单的本能来说明所有这些精美的工作。

沃特豪斯先生带领我研究了这个问题，他证明了蜂房的形态与相邻蜂房存在密切相关；以下观点也许只能被视为对他的理论的修正。让我们看一下伟大的级进原理，看看大自然是否向我们揭示了它的工作方法。某个简短系列的一端是一些土蜂，它们使用旧茧来盛放蜂蜜，有时还会在其中添加蜡质短管，并且也会制作独立且非常不规则的圆形蜡质

蜂房。该系列的另一端是双层的蜂房，众所周知，每个蜂房都是一个六边形棱柱，其六个侧面的底边都斜切成斜角，以便连接由三个菱形组成的倒锥体。这些菱形具有一定的角度，并且三个菱形在蜂巢的一侧构成一个蜂房锥体底面的三条边，正好形成反面三个连接的蜂房的底部。在蜜蜂极度完美的蜂巢与土蜂极度简单的蜂巢之间，有一个中间类型，就是墨西哥蜂的蜂房。休伯曾仔细地描绘过这种蜂房。墨西哥蜂的身体构造也处在蜜蜂和土蜂之间，但与后者之间关系更近。墨西哥蜂可以建造近乎规则的圆柱状蜡质组成的蜂巢，在小的蜂房中孵化幼虫，此外，还有一些大的蜂房用来储存蜂蜜。大的蜂房几乎是球形的，并且大小几乎相等，聚集为不规则的块。但是需要注意且很重要的一点是，这些蜂房始终以彼此接近的程度制成，如果球体已完成，它们将相交或破碎。但这是绝对不允许的，蜜蜂会在球体之间建立起完美平坦的蜡壁以易于彼此相连。因此，每个蜂房都由一个外部球形部分和两三个或更多的完美蜡壁组成，蜡壁的个数由相邻接的蜂房个数来决定。当一个蜂房与其他三个蜂房相接时，由于球体的大小几乎相同，这三个平面往往或必然会合为一个棱锥体，正如休伯所说，这个棱锥体显然与蜜蜂蜂房底部的三边锥体大致相似。就像在蜜蜂的蜂巢中一样，在这里，任何一个蜂巢中的三个平面必然会是三个邻接蜂巢的一部分。很明显，墨西哥蜂通过这种方式节省了蜂蜡，更重要的是节省了劳动力。因为相邻小室之间的蜡壁不是双层，而是具有与外部球形部分相同的厚度，但是每个蜡壁都成了两个蜂房的一部分。

考虑到这种情况，如果让墨西哥蜂蜂巢的球体彼此间隔一定距离，并且大小相等，对称地将它们排列成双层，那么最终的构造可能就与蜜蜂蜂巢一样完美了。因此，我写信给剑桥的米勒教授，做了一下陈述，这位几何学家认真地阅读了之后，告诉我这是完全正确的。

如果画出多个相等的球体，其中心位于两个平行面上；每个球体的中心与周围同层球心的距离等于或者小于半径的 $\sqrt{2}$ 倍，即半径乘以1.41421（或更小距离），并且与另一个层面上的球心距离相同；如果在两层中的几个球体之间形成相交平面，则将形成一个双层六边形棱柱，其底部由三个菱形组成的角锥体的底面连合而成。菱形和六边形棱柱侧面的每个角度，都与精确测量蜜蜂蜂房所得的角度相等。但是怀

曼教授告诉我，他曾认真做过许多测量，人们过分夸大了蜜蜂所做蜂房的精确度，因此，无论蜂巢的典型形状是什么样的，真的要达到这样的精确度也是很困难的。

因此，我们可以肯定地得出结论，如果可以完善墨西哥蜂已经拥有的不太完美的本能，那么这只蜂将筑造出像蜜蜂一样完美的蜂巢。我们可以想象，墨西哥蜂能够建造出真正球形并且大小相等的蜂房，这并不奇怪。因为它已经在一定程度上做到了这一点，并且我们还知道，有许多昆虫显然可以通过绕着固定点旋转，从而在树木中建成完美的圆柱形洞穴。我们同样也可以想象到，墨西哥蜂已经可以排列出圆柱形蜂房，那它也有能力把蜂房排成平层的。我们必须进一步假设，这也是最困难的，那就是墨西哥蜂能够以某种方式准确地判断，当数只蜂同时建造多个球形蜂房时，蜂房之间应该保持多远的距离。但到目前为止，墨西哥蜂已经能够很好地判断距离了，因为它总是让球形在一定程度上相互交叉，然后通过完整的平面将相交点合并在一起。本能的这种变异本身并不十分奇妙，我相信，蜜蜂通过自然选择获得了独特的筑巢能力。

我们可以通过实验来检验这个理论。仿照特格特迈尔先生的实验，我分开了两个蜂巢，并在它们之间放了一条长而厚的方形蜡板。蜜蜂立即开始在其中挖掘微小的圆形凹坑，随着它们不断加深这些小凹坑，小凹坑也越来越宽，直到被转换成与蜂房直径大体相同的浅盆形，看起来是球形的一部分。对我而言，最有趣的是，无论有多少只蜜蜂开始在附近一起挖掘这些小凹坑，它们都彼此相距一定的距离开始工作，以使这些盆形凹坑在获得上述宽度（即大约正常蜂房的宽度）时，凹坑的深度大约是形成球体直径的1/6，这时盆形凹穴的边缘就会彼此相交，或彼此穿通。一旦发生这种情况，蜜蜂就停止挖掘，并开始在凹坑之间的相交线上筑起平坦的蜡壁，从而使每个六边形棱柱都建在平滑的扇形边缘上，而不是建造在角锥体的三条直边上。

然后，我将一块细而窄的方形蜡板放在蜂巢中，代替上面所说的长方形厚蜡板，新蜡板如刀刃，上面涂有朱红色的颜料。然而，蜜蜂并没有受到影响，它们在适当的时候停止挖掘。凹坑一旦加深一点，就会出现平坦的底部。这些平坦的底部是由未被咬去的薄朱红色蜡板形成的，用肉眼判断，它们正好位于蜡片反面浅盆之间想象的交切面上。在不同

部分中，两个凹坑之间剩下的菱形板块有大有小，可见，在非自然状态下，这项工作做得不是十分精致。蜜蜂环绕咬着并加深两侧的凹坑时，必须在朱红蜡板的另一侧以几乎相同的速度工作，这样才能成功地在盆形凹穴之间留下平面，以便正好停在相交平面处工作。

考虑到薄蜡片的柔韧性，蜜蜂在蜡片的两侧工作时一定会在适当的位置停止工作。在普通的蜂巢中，在我看来，蜜蜂并不总是能够以相对相同的速度成功地在两侧进行工作。因为我注意到，一个蜂巢的底部尚有完成了一半的菱形，略微凹向另一侧，我认为是因为这一面的蜜蜂的工作速度太快，而对于凸出的那一侧来说，蜜蜂的工作速度则较慢。有一个明显的例子。我将蜂房放回蜂巢中，让蜜蜂继续工作一小段时间，然后再次检查，发现菱形壁已经完成，并且变得非常平坦。由于菱形小板的极薄性，绝对不可能通过咬掉凸面来达成这个效果。我怀疑在这种情况下，蜜蜂会站在对面的蜡壁前，将温热的可延展的蜡（按照我的尝试很容易做到）推入适当的位置，然后将其弄平。

从朱红蜡块的实验中，我们可以清楚地看到，如果蜜蜂要为自己建造一层薄薄的蜡壁，它们可以通过彼此间隔适当的距离来制造出适当形状的蜂房，以相同的速度开挖，并尽力制作相等的球形凹陷，但决不允许球体彼此穿透。现在，通过观察正在制造中的蜂房的边缘可以清楚地看到，蜜蜂确实首先在整个蜂巢周围形成了粗糙的围墙或边缘，然后它们从相反的方向咬凿，不断加深每个蜂房。它们不会同时构成任何一个蜂房的整个三面椎体的底面，而是先仅增长最边缘一个或者两个菱形板（视情况而定）；直到六面的壁开始出现时，它们才完成菱形板的上边缘。其中一些陈述与公正的休伯先生所做的陈述有所不同，但我坚信它们的准确性。如果有足够的篇幅，我可以证明，这些事实符合我的理论。

据我所见，休伯的说法是，第一个蜂房是从一面平行的蜡壁中挖出的，这一说法并不完全正确；因为开始存在一个小蜡兜，但我不会在这里做详细说明。我们看到了挖掘在蜂房的建造中起着多么重要的作用；但是，假设蜜蜂无法在适当的位置（即沿两个相邻球体之间的相交平面）建立粗糙的蜡壁，就无法建立完善的蜂房。我有几个标本清楚地表明，蜜蜂可以做到这一点。在粗糙的围墙边缘或蜂巢周围的蜡壁中，有

时也可能会观察到弯曲，其位置与未来蜂房地面的菱形壁板对应。但是在任何情况下，粗糙的蜡壁都必须通过两侧的咬凿工作才能变得精致光滑。蜜蜂的建造方式令人好奇，它们总是使最初建造的蜂房壁比最终完成的蜂房壁厚10到20倍。我们要了解蜜蜂是如何工作的，首先要设想泥瓦匠将水泥堆成一堵宽阔的墙基，然后在靠近地面的两侧切掉相等的水泥，直到中间留下光滑而薄的墙为止。泥瓦匠总是将切下来的水泥和新水泥和在一起，然后又堆在墙壁的顶上，让墙壁逐渐增高，但是墙壁的最上面会有一个厚大的顶盖。因此，所有的蜂房壁，无论是刚开始建造的，还是已经完成的，上面总有一个坚固的蜡盖。这样，蜜蜂可以在蜂巢上成群地爬行，而不会损坏精致的六角形壁。米勒教授曾经测量过，蜂房壁的厚度并不一样，巢边缘经过12次测量后得出的平均厚度为0.07毫米（1/352英寸），而底部的较厚菱形板的平均厚度是0.11毫米（1/229英寸），二者的厚度比值接近2：3。通过这种奇特的方式来建造蜂巢，消耗的蜡最少，而且可以使蜂巢更坚固。

许多蜜蜂都一起工作，想知道它们是如何建造蜂房的，似乎有难度。一只蜜蜂在一个蜂房短时间工作后又去了另一个蜂房，因此，正如休伯所说，在第一个蜂房开始建造时，已经有20多只蜜蜂在此工作过。实际上，我可以证明这一事实的正确性。用一层非常薄的熔化朱红色蜡片覆盖整个蜂房的六角形壁，或者覆盖正在建造的蜂巢的外端边缘，从而发现，颜色被细腻地散布开来，就像漆匠刷过的那样，这是因为蜜蜂取出了有色蜡质微粒，然后将它们加工分散到周围的蜂房壁上了。在许多蜜蜂之间，建造蜂房的工作似乎是均衡分配的，它们本能地以彼此相等的距离站立，挖掘大小相等的球穴，然后建立或保留它们之间的相交平面。让人很惊奇的是，在遇到困难的情况下，例如当两个蜂巢以一定角度相遇时，蜜蜂通常会将已建好的接触处的蜂房拆除，并以不同的方式重建一个蜂房，有时会恢复为最初被建造的样子。

当蜜蜂有一个适当的位置，可以站立此处进行工作时，例如，向下建造的蜂房正下方有一块木板时，那么，必须将蜂巢建在木板的上方，在这种情况下，蜜蜂可以在完全合适的位置铺设一个新的六面体的壁的基础，并突出到早已建好的蜂房外面。只要足以使蜜蜂彼此之间以及与最后完成的细胞壁之间保持适当的相对距离，然后凿掘假想的球体，便

可以在两个相邻球体之间建造中间的壁；但是据我所知，直到该蜂房和相邻蜂房的大部分都已建成为止，蜜蜂是绝对不会修理蜂房的角落的。在某些情况下，蜜蜂在两个刚起步的蜂房之间建造墙壁的能力很重要，因为它涉及一个事实，那就是在黄蜂蜂巢最边缘的细胞有时是严格的六角形；乍一看，这似乎与上述理论不相符，但是我现在不想讨论这个问题。在我看来，单独一只昆虫（如黄蜂）制造六角形蜂房，似乎也不是一件难事，只要它在两三个同时开始建造的蜂房内外交替工作，并且在刚开始建造时使这些蜂房保持适当的距离，凿掘球体或圆柱体，并建立中间的壁就可以了。

由于自然选择仅是通过对构造或本能的微小变异的积累起作用，每一种构造或本能在其生存条件下对个体都是有利的，因此就有理由问，经过变异的筑巢本能如何长期延续地逐步发展，如何使蜜蜂的祖先受益呢？这个问题不难回答：众所周知，蜜蜂常常很难获得足够的花蜜。特盖特迈耶先生告诉我，他在实验时发现，蜂巢中每分泌0.45千克（1磅）蜡就会消耗不少于5.44~6.80千克（12~15磅）的干糖；因此，蜜蜂必须收集并消耗大量的花蜜，以分泌出建造蜂巢所需的蜡。此外，许多蜜蜂在分泌过程中必须保持许多天不工作。为了在冬季养活大量蜜蜂，储存大量的蜂蜜是必不可少的，并且我们知道，蜂巢的安全性主要取决于蜂群的数量。因此，通过大量节省蜡来节省蜂蜜以及蜜蜂采蜜的时间，必定是任何蜜蜂家族成功的最重要因素。当然，任何种类蜜蜂的成功都可能取决于其寄生虫或其他敌人的数量，或者取决于完全不同的原因，这些都与蜜蜂可以收集的蜂蜜数量无关。但是，让我们假设，蜂蜜的数量决定了一个地区可能存在的蜂群的数量；如果该蜂群要度过整个冬季，就需要储存一定量的蜂蜜。在这种情况下，如果蜂的本能稍有变异，使蜡质蜂房靠在一起，并且使其相交于一点，这将对整个蜂群有利，因为如果两个相邻的蜂房共用一个墙壁，可以节省一些劳力和蜡。因此，如果蜜蜂的蜂房越来越规则，并且越来越紧密地聚集在一起，就像墨西哥蜂的蜂房一样聚集成团，这将对蜂群越来越有利。因为在这种情况下，每个蜂房的大部分边界表面将与相邻的蜂房共用，可以节省很多劳力和蜡。出于同样的原因，如果墨西哥蜂使自己的蜂房更加紧密，并且在各个方面都比目前更加规则，那对墨西哥蜂来说是有利的。因为正如我们看到的，球形表面将完全消失，全部由平面替代，墨西哥蜂的

蜂巢就会像蜜蜂巢一样完美。这样完美的构造，自然选择是无法做到的。因为据我们所见，蜜蜂的蜂巢在节省蜡质和劳动力方面是绝对完美的。

正如我相信的，所有已知本能中最美妙的本能，例如蜜蜂筑巢的本能，都是自然选择保留了简单本能并经历无数次连续且轻微的变异而形成的。经过缓慢的过程，自然选择可以越来越完美地使蜜蜂在双层上建造距离相等且大小相等的球体，并沿相交平面积聚并挖掘出蜡壁。当然，蜜蜂并不知道它们彼此之间以特定距离在凿掘球体，就如它们不知道六边形棱柱和基底菱形板的角度是多少一样。自然选择过程的动力在于尽量节约劳动力和蜡的同时，建造出具有应有强度、适当大小和形状的蜂巢。如果一个蜂群能够使用最少的劳动力、最少的蜂蜜建造出最好的蜂房，这样就能取得最大的成功。并且，蜜蜂通过遗传还会将其新获得的节约本能传递给新的蜂群，而这些蜂群又将有最大的机会在生存斗争中获得胜利。

反对把自然选择学说应用于本能上的理由：中性的和不育的昆虫

对上述本能起源的观点，有人曾反对：“构造和本能的变异一定是同时发生的，并且相互之间是密切协调的，如果一方发生变异的同时另一方没有立即产生相应的变异，就会导致死亡。”这种异议的说服力完全是建立在构造和本能的变异都是突然发生这一假设上。前面章节谈到的大山雀能够作为例子。这种鸟经常站在树梢上，用双脚夹住紫杉的种子，用喙去啄，直到啄出种仁。鸟的喙在形状上出现的有利而微小的变异都通过自然选择得以保存，这样喙越来越适合啄破这类种子，直到形成完全适应这种目的的具有完美构造的喙。与此同时，习性，或强迫，或嗜好的自发变异，导致这种鸟逐渐成了一种食用种子的鸟。用自然选择学说对此进行解释完全没有任何困难。在这个例子中，假设习性或嗜好先开始缓慢地发生变化，然后通过自然选择，喙才慢慢地发生变化。然而，假设大山雀的脚和喙有关，或由于其他未知的原因发生了变异而逐渐变大，脚的增大可能会增强这种鸟的攀缘能力，直至获得像大山雀那样显著的攀缘能力和力气。之所以如此，是设想由于构造的逐渐变化导

致了本能习性的变化。再举一个例子：生活在东方岛屿上的雨燕，全部用浓缩的唾液来建造巢穴，很少有比这更奇异的本能了。有些鸟类用泥巴筑巢，可以断定其中混有唾液。我看到北美洲的一种雨燕，用唾液将小枝甚至是碎枝粘起来筑巢。那么，自然选择通过对分泌唾液越来越多的雨燕个体产生作用，最终便会产生一种物种，具有专门用浓缩的唾液而不用其他材料筑巢本能，这也是有可能的。其他情况也是如此，但是我们必须承认，在众多事例中，我们还没有办法确定，究竟是本能还是构造先发生了变异。

毫无疑问，许多很难解释的本能可能会与自然选择理论相抵触。例如，我们无法了解有些本能是如何起源的；不存在中间过渡状态的情况；有些本能的重要性显然如此微不足道，以至于自然选择几乎不可能对它们产生作用；在自然界如此遥远的动物中，本能的情况几乎相同，以至于我们无法通过从共同祖先遗传来解释它们的相似性，因此必须承认它们是通过独立的自然选择行为获得的。我不会在这里讨论这几种情况，而是要集中讨论一个特殊的难点，这在我最初看来是无法克服的，并且对我的整个学说是致命的。我指的就是昆虫群落中的中性个体，即不育的雌性：因为这些中性个体的本能和构造，通常与雄性和可育雌性差异很大，而且由于不育，它们无法繁殖后代。

这个问题值得详细讨论，但在这里我仅举一个例子，即不育的工蚁。如何使工蚁处于不育状态是一个难点，但不比其他任何明显的构造变异更难；因为可以证明自然状态下的某些昆虫和其他具关节的动物有时也会变得不育。如果这种昆虫是社会性昆虫，每年有一定数量的个体有工作能力，但无繁殖能力，并且能使群体从中获利，那么实现这个结果对自然选择来说就没有很大的困难。最大的困难在于，工蚁在构造上与雄性和育性雌性都大不相同，例如胸腔的形状、没有翅膀、有的没有眼睛，以及在本能上也不同。就本能而言，工蜂与完整雌性之间在这方面的巨大差异，蜜蜂就是很好的例子。如果工蚁或其他中性昆虫是处于正常状态的动物，我应该毫不犹豫地假设其所有特征都是通过自然选择而慢慢获得的；就是说，个体出生时对构造进行了一些稍微有利的变异，这种变异又被其后代遗传，后代又发生变异，然后又被选中，依此类推。但是，工蚁就大不相同了，它与它的父母差异很大，又是绝对不

育，因此它永远不可能将其构造或本能上连续获得的变异传递给它的后代。有人可能会问，这种情况怎么会符合自然选择学说呢？

首先，要记住，无论是家养状态下的物种，还是自然状态下的物种，有无数种例子可以证明，被遗传的各种各样的构造上的差别，都与某些年龄和性别有关。我们已知的差异不仅与性别有关，而且与生殖系统活跃时的那个短时期有关，例如许多鸟类交配时节的婚羽和雄鲑的钩状颚。经过人工阉割的公牛，不同品种的牛角可能略有不同；某些品种被阉割的公牛牛角的长度，与相同品种正常公牛或母牛的牛角相比，要比其他品种被阉割的公牛的牛角要长。因此，在昆虫群落中，某些个体的任何性状变得与不育状况相关联，并没有多大的难点，难点在于了解如何通过自然选择缓慢积累这种相关的构造上的变异。

这种困难虽然看起来无法克服，当我清楚自然选择可能既适用于个体，也适用于整个家系，并且因此可以达到预期的目的时，难度便会减轻了，或者如我相信的，难点会消失。牛的饲养者希望肉和脂肪能很好地融合在一起；虽然具有这种特征的牛已被宰杀，但育种者相信可以从这牛的原种育出，并且获得了成功。我对自然选择的能力充满信心，所以我毫不怀疑，仔细观察哪些公牛和母牛在配对会生产出牛角最长的去势公牛，从而慢慢就能培育出总是生产牛角特别长的牛的品种，虽然从来没有去势公牛繁殖过自己的后代。这里有一个确切的而且更好的例证，据弗洛特说，一年生重瓣紫罗兰的某些变种，经长时间认真地选择，到适当的程度时，产生的幼苗常常会开出许多重瓣而不育的花，但它们也会产生一些单瓣和可育的植株。只有这单瓣可育的植株才可以繁衍这个变种，可将其比作可育的雄蚁和雌蚁，而重瓣不育的植株则相当于那些中性的工蚁。无论是紫罗兰的这些变种，还是社会性的昆虫，选择的目的不是有利于个体，而是有利于整个家系。因此我认为，对于社交型昆虫来说，与社群中某些个体不育相关的构造或本能的轻微变异对社群是有利的，同一社群中可育的雄性和雌性因此而蓬勃发展，并向它们的可育后代传递了产生具有相同变异的不育成员的趋势。我相信这个过程已经重复了无数次，直到在同一物种的可育和不育雌性之间产生了巨大的差异，正如我们在许多社会型昆虫中看到的那样。

但是我们还没有触及困难的顶峰，有几种蚂蚁种，不育的工蚁不仅

与可育的雌性和雄性不同，而且彼此之间也有差异，有时会达到几乎不可思议的程度，因此可以被分为两个或三个等级。而且，不同等级通常区别很明显，但是往往缺乏渐进的特征，彼此的区别就像同属中的任何两个种，或者像同科中的任何两个属。因此，埃西顿蚁的中性蚁有工蚁和兵蚁两种，它们的颚和本能都截然不同；隐角蚁工蚁只有一个级，头上有一种奇妙的盾牌，这种盾牌的用途还鲜为人知；在墨西哥壶蚁中，有一种工蚁永远不会离开巢穴，由另一级别的工蚁喂养，并且它们的腹部发达，可以分泌一种汁液，代替了蚜虫的分泌物；这些蚜虫被视作能提供食源的“奶牛”，欧洲的蚁类通常会将它们看守和圈养起来。

如果我不承认这样奇妙而确定的事实可以立即摧毁我的学说，确实有人会以为，我对自然选择的原理太自负了。在较简单的中性昆虫案例中，中性昆虫只有一个级，我相信这完全有可能是由于自然选择的作用，导致中性昆虫不同于可育的雄性和雌性，在这种情况下我们可以确认，从一般变异类推来看，每个连续的、轻微的、有利的变异，可能最初都不会出现在同一个巢的所有中性个体中，而是发生在个别中性个体上。这样的群体才能更好地存活下来，通过长期选择能育出更多中性后代的可育雌性，让它们产生有利变异，最终才使所有中性个体都具有了相同的变异特征。根据这种观点，我们偶尔应该在相同的巢中发现相同物种的中性昆虫，它们呈现出不同级别的构造，而且我们确实发现过，由于很少有欧洲以外的中性昆虫被仔细研究过，甚至可以说这种情况并不罕见。史密斯先生已经证明了，有几种英国蚂蚁的中性个体在大小和颜色上的差异令人惊讶，而且极端类型有时可以由同一巢穴中的个体完美地链接在一起。我自己比较了这种完美的级进类型，经常发现体型较大或较小的工蚁最多，或这两种体型的数量都很多，而中等大小的数量很少。黄蚁的大小不一，中等大小的个体比较少。并且，正如史密斯先生观察到的，在这个物种中，较大的工蚁有单眼，虽然眼睛很小，但可以清楚地区分，而较小的工蚁则只有单眼的残迹。在仔细剖析了这些工蚁的几个标本之后，我可以断言，较小工蚁的眼睛已经高度退化了，无法通过按体型比例缩小解释。我完全相信，尽管我不敢这么肯定地断言，中等工蚁的单眼正好处于中间状态。因此在同一巢穴中，我们可以发现两种不同的中性工蚁，不仅大小不同，而且视觉器官也各不相同，但却可以通过中间状态的少数几个个体连接起来。我可能要补充一点，

如果较小的工蚁对社群最有用，并且不断选择那些可以生育较小不育后代的雄性和雌性，那么就会产生越来越多的较小的工蚁，直到所有工蚁都成为这个状态为止。那么就应该形成了一种与褐蚁属中的中性个体几乎完全相同的中性蚂蚁物种。对褐蚁属的工蚁来说，甚至没有单眼的痕迹，尽管该属的雄蚁和雌蚁都有发达的单眼。

我还可以举另一个例子：我很自信地期望在同一物种的中性不同级不育个体之间，发现重要构造上的中间过渡类型，所以我很高兴地利用史密斯先生提供的来自西非驱逐蚁同一巢穴的大量标本。我不提供实际测量值，而是给出严格准确的说明，读者也许会最好地理解这些工蚁之间的差异。这些，就像我们看到一群工人在盖房子一样，有些工人高1.63米（5英尺4英寸），有些工人高4.88米（16英尺）。但是我们必须假设，较大工人的头比较小工人的不止大3倍而是4倍，而颚几乎是5倍。而且，几种大小的工蚁，在颚的形状、牙齿的形状和数量上都非常不同。但是对我们来说最重要的事实是，尽管可以将工蚁分为不同大小的级别，但它们之间的差别是很难清楚区分的，即使差别极大的颌骨构造也是如此。我对谈论工蚁的颚充满信心，因为拉伯克爵士曾把我解剖的几种大小不同工蚁的颚描绘出来了。

有了这些事实，我相信，自然选择通过对有生育能力的雌雄蚁发挥作用，会形成一个应该习惯产出体型大而具有某种形态颚的中性后代的物种；或习惯产出体型小而具有不同构造的颚的中性蚁；或者习惯于能同时产出两群具有不同大小和构造的工蚁；最后一点是我们最难弄清楚的，像驱逐蚁一样，首先形成了一个级进系列，然后通过自然选择使它们的父母得以生存，产生了越来越多的两个极端类型的个体，直到没有中间类型的存在。

华莱士和米勒两位先生曾对同样复杂的例子分别提出了相似的说明。华莱士的例子是，某种马来西亚的蝴蝶的雌体，通常表现为两种甚至是三种差异明显的类型。米勒所举的例子是，一种巴西的甲壳动物也有大不相同的两种雄体类型。但没有必要在此讨论这个问题。

因此，正如我相信的，起源于同一巢穴中的两个级进分明的不育工蚁的奇妙事实已经出现，它们彼此之间以及与父母之间都存在很大差

异。我们可以看到，正如分工对文明人有用的原则一样，它们的产生对蚁类社群有很大用处。由于蚂蚁是通过遗传本能和工具或器官，而不是通过获得的知识和制造的工具来工作的，因此只有通过保持不育工蚁的存在，蚂蚁才能实现完美的分工。我相信，自然通过选择的方式在蚁群中实现了令人钦佩的分工。但是我必须承认，以我对这一自然选择原理的全部信念，如果没有这些中性昆虫的案例使我相信这一事实，我绝对不会想到自然选择会如此高效。因此，为了显示自然选择的力量，我以很少但完全不足的长度讨论了这种情况，同样，因为这是我的学说遇到的最严重的特殊困难。这种情况也是非常有趣的，因为它证明了动物和植物一样，构造的任何变异量都可以通过大量细微的（我们必须称其为偶然的）有利变异的积累来实现，而不是通过训练或习性的作用。在一个社群中不育个体的习性，无论经过多长时间，也不可能会影响到这些可育成员的构造或本能。令我惊讶的是，没有人利用这一著名的中性昆虫案例，去反对拉马克提出的“获得性遗传”的学说。

摘要

在本章中，我简要地说明了家畜的智力性能是可以产生变异的，并且这些变异是可以遗传的。我试图更简单地证明本能在自然状态下也会发生轻微变异。没有人会质疑本能对任何动物都至关重要。因此，在生存条件变化的情况下，自然选择作用可以将任何本能上的微小有利变异积累到任何程度，这没有什么真正的困难。在某些情况下，习性或器官使用和不使用可能发挥了作用。我不敢说本章中给出的事实在很大程度上增强了我的学说；但据我判断，所有困难情况都没有摧毁它。另一方面，本能并不总是绝对完美的，而且容易出错。没有专为其他动物的利益而产生的本能，但每种动物都利用了其他动物的本能。自然历史中的“自然界没有飞跃”这一格言既适用于本能又适用于身体构造，可以简洁明了地解释在上述观点，如果不是这样的话，那就无法解释了。所有这些事实都更加巩固了自然选择学说。

关于本能的其他事实也加强了这一学说，就像栖息在世界上相距遥远的地区，并且生活在截然不同的生存条件下，亲缘关系紧密的不同物种，通常却保持几乎相同的本能一样。例如，我们可以通过遗传原理来

理解，为什么南美洲热带的鸫与英国的鸫一样用泥巴筑巢；为什么非洲和印度的犀鸟都具有这样的本能：把雌鸟用泥封在洞内，雄鸟从封口处留的小孔来饲喂雌鸟及孵出的幼鸟？为什么北美鹪鹩和欧洲的鹪鹩都是雄性筑巢，这种习性完全不同于其他任何已知的鸟类。最后，这也许不是逻辑上的推论，但是据我的想象，这种看法更令人满意，即把这些本能——即年幼的杜鹃会将其义兄弟挤出巢外，蚂蚁蓄养奴隶，姬蜂的幼虫寄生在活的毛虫体内等——不是特别赋予或创造的本能，而是一种普遍法则的微小后果，这一法则导致所有生物的演变，即繁殖、变异，让最强者生存和最弱者死亡。

第九章：杂种性质

初始杂交不育性和杂种不育性的区别

博物学家普遍认为，物种相互交配时具有不育性，以防止物种之间混杂。这种观点乍看之下是有可能的，因为如果一个地区的物种能够自由杂交，那么它们几乎不可能保持不同。这个问题对我们来说很重要，尤其是首次杂交时的不育性和其杂种后代的不育性，对物种来说可能没有任何好处，因此不能通过保持连续有利的不育性获得，不育性是由亲本物种获得性差异所附带的。

在处理这个问题时，有两类事实在很大程度上有根本的不同，但是人们通常会将它们混在一起，即两个物种首次杂交时的不育性和由它们产生的杂种的不育性。

纯种当然具有处于理想状态的生殖器官，但是进行种间杂交时，它们几乎不会或者很少产生后代。另一方面，从植物和动物的雌性生殖质可以看出，杂种的生殖器官在功能上是无效的，尽管据显微镜显示，它们生殖器官本身的构造是完善的。在第一种情况下，形成胚胎的两个雌雄生殖器官都是完善的。在第二种情况下，它们要么根本不发育，要么发育不完善。当必须考虑两种情况共同的不育性原因时，这种区别就很重要。由于这两种情况的不育都被视为特殊的天赋，超出了我们的理解能力范围，因此往往忽略了它们的区别。

在我的学说中，变种被认为是起源于同一个物种的不同形式，不同变种间杂交的可育性以及杂种后代间杂交的可育性，与物种间杂交的不育性同等重要，因为它似乎在变种和物种之间做出了明确的区分。

不育性的程度

首先，我们来看看物种间杂交的不育性及其杂种后代的不育性。有

两位尽职尽责且令人钦佩的观察家科勒特和盖特纳，他们几乎一生都致力于研究这个问题，只要读过他们的回忆录和著作的人，都会对某种程度不育现象的高度普遍性有深刻的印象。凯洛依德使这个规则普遍化了，但随后在10个案例中，他发现有两种类型（大多数作者认为是不同的物种）杂交后是可育的，因此他毫不犹豫地将它们归为变种。盖特纳也使该规则普遍化了，但他对凯洛依德10例中的完全可育性表示怀疑。在这种情况以及其他许多情况下，他必须对种子的数目进行统计，以表明存在一定程度的不育性。他总是将两个物种初次杂交后产生的最大种子数以及它们的杂交后代产生的最大种子数，与两个纯种亲本在自然状态下产生的平均种子数进行比较。但是在我看来，这将导致一个严重的错误，原因就是：要杂交的植物必须被去势，而且必须被隔离，以防止其他植物的花粉被昆虫带过来。盖特纳实验的几乎所有植物都是盆栽的，而且被保存在他家的一个房间里。毫无疑问，这些过程通常会危害植物的可育性；因为盖特纳用了20种已去势的雄性植株，并用它们自己的花粉人工授精，除了公认的操作困难的豆科植物外，其中一半植物的可育性在一定程度上受到了损害。此外，最杰出的植物学家都将常见的红花蘩缕和蓝花蘩缕列为变种，但是盖特纳在反复杂交之后，发现它们完全不育。我们很可能会质疑盖特纳的结论，即怀疑许多物种在杂交时是否真的如此不育？

可以肯定的是，一方面，各个物种杂交时的不育程度差异很大，并且是以难以察觉的速度缓慢消失的；另一方面，纯种的繁殖力很容易受到各种环境的影响，很难确定可育终端与不育开端的界限。我认为，科勒特和盖特纳这两个最有经验的观察者的例子是最好的证据，他们就同一物种得出了截然相反的结论。对比这两位植物学家的证据、不同杂交者根据可育性提出的证据，或由同一观察者根据不同年份进行的实验得出的证据，很有启发。可以证明，不育性和可育性都无法明确区分物种和变种；但是来自这方面的证据越来越少，并且与来自其他方面的证据同样值得怀疑。

关于杂种后代的不育性，尽管盖特纳能够培育一些杂种，小心地保护它们免于与亲本的杂交，这样培育六七代，甚至是到第十代，但他肯定地说，杂种的可育性从未增加，反而大大降低了。对于这种情况，最

初我们可能注意到，如果杂种的两个亲种都在构造或体质上出现任何偏差，遗传给后代时往往会增强，并且在一定程度上会影响杂种植物的两性生殖质。不过我相信，在这些实验中，可育性都是由于另外一个原因降低的，即由近缘杂交而导致的。我搜集了许多事实，都表明近缘类型的交配会降低后代的可育性；另一方面，偶尔与不同的个体或变种杂交会增强可育性，我无法怀疑这种观点的正确性。实验学家很少培育出大量的杂种，由于亲种或其他近缘杂种通常生长在同一花园中，在开花季节必须谨慎地防止昆虫的到来。因此，杂种通常在每一代中都是自花授粉的；我坚信，这将对它们的可育性造成伤害，因为源于杂种的情况本身已经降低了它们的可育性。盖特纳一再声明，即使是可育性较低的杂种，如果用相同类型的杂种花粉人工授精，尽管其操作频繁会带来不良影响，但它们的可育性有时还是会明显增强，并逐代持续增强。现在，在人工授精中，花粉是来自另一朵花还是来自本身要受精的花，机会是均等的（据我自己的经验，确实如此）。这样一来，虽然可能生长在同一株植物上，但两朵花之间却可以杂交。此外，每当进行复杂的实验时，盖尔纳都会小心翼翼地去掉杂种的雄蕊，这将确保每一代植株都能与同一植物的另一朵花或者同一变种不同植株的花的花粉杂交。因此我认为，人工授精杂交后代的可育性代代增强与自发自花受精的结果正好相反，这一奇怪事实是为避免近缘杂交造成的。

现在让我们来看第三位经验丰富的杂交工作者赫伯特牧师得出的结论。他强调，有些杂种完全可育，和它的纯种亲本一样。凯洛依德和盖特纳都认为不同物种之间一定程度的不育是自然的普遍规律。赫伯特与盖特纳一样，对一些相同的物种进行了实验。我认为，结果的差异部分可以归因于赫伯特出色的园艺技术以及他掌握的温室。我仅举他的许多重要陈述中的一个为例，即“将长叶文殊兰豆荚中的每个胚珠授以卷叶文殊兰的花粉，产生了一个我们在自然受精情况下从未见过的植株”。在这个例子中，两个不同物种之间的初次杂交拥有了完美的可育性。

文殊兰属的这个案例使我想起一个奇特的事实，那就是像半边莲属、毛蕊花属、西番莲属的某些物种的植株，异株植物的花粉更容易使它们受精，而同株植物的花粉却不能，尽管这些同株植物的花粉都是可育的，因为它们可以促使其他植株受精。希得伯朗教授在朱顶红属和紫

堇属中发现了这种特别的情况，斯科特先生和米勒先生在各种兰科植物中也发现了这种特别的情况。因此，由于不容易自体受精，某些物种的一些异常个体和某些物种的所有个体实际上更容易杂交。例如，一棵朱顶红的球茎产生了四朵花，赫伯特用它们自己的花粉给其中三株花授精，随后用另外三株复合杂种的花粉给第四株授精，结果是“前三朵花的子房很快就停止生长，几天就完全枯萎了，而由杂种花粉授精的豆荚则生长旺盛，成熟迅速，并结出了能自由生长的良种”。赫伯特先生在随后多年继续该实验，并且始终能获得相同的结果。这些事实表明，一个物种可育性的高低有时取决于一些细微而不可察的因素。

园艺家的实验虽然没有科学上的精确性，但值得一提。众所周知，天竺葵属、倒挂金钟属、蒲包花属、矮牵牛属、杜鹃花属等物种，曾经经历了非常复杂的杂交，但其中许多杂种却可以自由繁殖。例如，赫伯特断言，在一般习性上最不相同的物种是皱叶蒲包花和车前叶蒲包花，它们的杂种“繁殖力非常好，就好像是智利山上的自然物种一样”。关于杜鹃花属的一些复合杂种的可育性，我可以肯定其中许多都是完全可育的。例如，诺布尔先生告诉我，他把小亚细亚杜鹃植物和北美山杜鹃的杂种嫁接在栽培的砧木上，这样的杂交种“拥有我们所能想象的自由结子的能力”。如果处理得当，杂种在以后的每一代中都会继续降低可育性，正如盖特纳认为的那样，这一事实必将引起园艺家们的注意。园艺家在广大的园地上培育了相同的杂种，这样才能以昆虫为媒介，使个体之间可以自由地相互杂交，从而避免近交繁殖的有害影响。通过检查不育性较高的杂交杜鹃花，我们就会相信昆虫媒介的效率，因为杂交杜鹃花本身不会产生花粉，却会在它们的柱头上发现从其他花中带来的大量花粉。

关于动物，与植物相比，经过认真尝试的实验要少得多。如果我们的分类系统是可以信任的，也就是说，如果动物的属和植物的属一样彼此之间区别明显，那么我们可以推断，在自然系统中差别更大的动物比植物更容易杂交。但我认为动物杂种本身更为不育。不过应该牢记的是，很少有动物在封闭条件下自由繁殖，因此就很少进行相关试验。例如，金丝雀已经与其他九种雀科杂交，但这些雀没有一种能在封闭的环境中正常繁殖，我们就不能指望它们与金丝雀之间的第一次杂交，或它

们的杂种完全可育。此外，关于比较可育的杂种动物后代可育的例子，我几乎一个也不知道：由不同亲种同时建立起相同杂种的两个家系，从而避免了近亲杂交的不良影响。相反，通常在每一代后代中，兄弟姐妹之间常常会杂交，这却与每个育种者不断重复的告诫相反。在这种情况下，杂种的内在不育性会继续增加一点也不奇怪。

尽管我不知道任何经过充分证实的完美可育杂种动物的例子，但我有理由认为，凡季那利斯羌鹿和列外西羌鹿的杂种以及东亚雉和环雉之间的杂种，具有很好的可育性。奎特伦费吉说，在巴黎的两种野蚕（柞蚕和阿林地亚蚕）的杂种，已经被证明自行杂交八代之后仍然可育。最近又有人断言，两个极其不同的物种，比如野兔和家兔，若彼此杂交也能得到杂种后代，并且用后代与任一亲种杂交，都是高度可育的。欧洲普通鹅和中国鹅非常不同，以至于它们通常被列在不同的属中。在英国，两者杂交也能得到杂种后代；后代与任何一个亲种杂交，通常也是可育的；并且在一个实例中，杂种之间的交配也是可以繁殖的。这是埃顿先生的实验成果，他从不同孵化场中的同一亲种中培育了两只杂种鹅。从这两只鹅中，他又育出了不少于八只杂种（纯种鹅的孙代）。但是在印度，这些杂种鹅的可育性必定高得多，因为布莱斯先生和赫顿上尉这两位杰出的鉴赏家向我保证，这些杂种鹅都在该国各地被成群饲养；由于它们是为牟利目的而存留的，在没有纯种鹅的情况下，它们肯定是高度可育的。

至于家养动物，不同品种间彼此杂交都是具有可育性的。大多数家养动物起源于两个或多个土著物种的杂交繁衍。根据这种观点，土著亲种要么必须首先产生了非常可育的杂种，要么这些杂种必须在驯养的后代中变得非常可育。在我看来，后一种情况最有可能，这一情况首先是由帕拉斯提出的，尽管没有任何直接证据，但我倾向于相信它的真实性。例如，我相信我们的狗是从几种野生动物中繁殖而来的。但是，也许除了南美洲的某些本地家养犬外，其余的家养犬都能很好地杂交繁育。这样的类推让我非常怀疑，这几种原始野生物种起初是否会自由繁殖并产生可育的杂种。最近，我又得到了一个重要证据，即印度瘤牛与普通牛杂交的后代互相交配后是完全可育的。据卢特梅耶对这两种牛骨骼的观察结果，以及从布莱斯先生传达给我的事实来看，它们之间有重

要的不同，因此我认为它们必须被视为不同的物种。家猪的两个品种同样如此。因此如果坚持物种在杂交时一般不育的看法，就必须承认动物的这种不育性是可以在家养条件下被消除的。

最后，考虑到所有有关动植物杂交的事实，可以得出结论，无论是初次杂交还是杂种，一定程度的不育都是极为普遍的结果。但是在我们目前的知识状态下，它不能被认为是绝对普遍的。

支配杂种不育性的规则

现在，我们将更详细地考虑控制首次杂交和杂种的不育性规则。我们的主要目的是查看这一规则是否一定赋予了物种不育性，以防止它们相互杂交并完全混淆在一起。以下规则和结论主要来自盖特纳在植物杂交方面的出色工作。为了确定规则在动物身上的适用程度，我付出了很大的努力，并且考虑到对杂种动物的了解还很少，我惊讶地发现相同的规则在动植物界的适用范围是多么广泛。

前面已经提到过，无论是初次杂交还是杂种，其可育程度都可以从零到完全可育。令人惊讶的是，这种渐变可以以多种奇妙的方式表现出来。但是这里只能给出这些事实的粗略概述。当将某一科植物的花粉放在另一科植物的柱头上时，它所产生的影响像无机粉尘一样。从这个绝对的育性零值开始，将同一属不同物种的花粉施加到某些物种的柱头上，就可以使所产生种子的数量产生逐级的变化，直至完全可育。正如我们已经看到的，在某些异常情况下，甚至超出了植物自身花粉所能产生的可育性。因此，在某些杂种中，即使有纯亲本的花粉，也可能从未产生过甚至绝对不会产生一个可育种子。但是在某些情况下，通过授以一种纯亲本的花粉，可以使杂种的花早于其他的花枯萎；花的早谢是初期受精的标志。我们有各种各样的例子表明，这种自交极度不育的杂种可以产生越来越多的种子，直至达到完全可育。

如果有两个物种很难杂交，很少产生任何后代，通常它们的杂种是不育的。但是，进行首次杂交的难度与由此产生的杂交种的不育性（两者通常被混为一谈），二者之间有所不同。在众多情况中，如毛蕊花属，两个纯种可以很容易就杂交，并产生大量杂种后代，但这些杂种非

常不育。另一方面，有些物种很少能杂交，或者极难杂交，但是产生的杂种却非常可育。即使在同一属的范围内，例如在石竹属中，也会同时出现这两种相反的情况。

与纯种的可育性相比，初次杂交的可育性和杂种的可育性更容易受到不利条件的影响。但是，初次杂交的可育性本身是可以变化的。因为相同的两个物种在相同的环境下杂交，可育性并不总是相同的，部分取决于碰巧被选择用于实验的个体的体质。杂种也是如此，因为通常发现同一蒴果的种子，在完全相同条件下培育出的几个个体，可育性也有很大差异。

术语“亲缘关系”是指物种之间在体质和构造上的总体相似性。现在，物种之间的初次杂交以及由此产生的杂种的可育性，在很大程度上取决于它们的亲缘关系。所有被分类学家列为不同科的物种之间从来不会产生杂种，与之相反，亲缘关系极近的物种间通常容易产生杂种。另一方面，分类系统中的亲缘关系和杂交的难易性之间的一致性也绝非严格。可能有很多案例涉及非常近缘的物种，这些物种之间不能杂交，或者极难杂交。另一方面，又有许多非常不同的物种很容易杂交。在同一科中，可能有一个像石竹属这样的属，其中许多物种最容易杂交。还有另一个属，如麦瓶草属，即使付出努力也未能在亲缘极近的物种之间产生一个杂种。在同一属内，我们也会遇到同样的差异，例如与几乎其他所有属的物种相比，许多烟草属的物种的杂交程度更高。但盖特纳发现，智利尖叶烟草虽然不是一个特别独特的物种，却极难杂交，曾用至少八个其他烟草种做过试验，都不能使它受精；它也不能使其他物种受精。类似的事实还有很多。

对于任何可识别的性状，没有人能够指出，什么样类型的差异或多大的差异才可以防止两个物种杂交。但可以发现，在习性和外观上差异最大的植物是可以杂交的。一年生和多年生植物，落叶和常绿乔木，尽管生长在不同地点并适应极端不同气候，却通常可以轻松地杂交。

通过两个物种之间的互交，我的意思是，例如，首先将一匹公马与一头母驴杂交，然后再将一头母马与公驴杂交，然后就可以说这两个物种已经互交了。进行相互杂交的难易性常常存在极大的差异。这样的案

例非常重要，因为它们证明了，任何两个物种杂交的能力，通常完全独立于它们在系统中的亲缘关系，也就是说，与生殖系统之外的其他任何构造上或体质上的差异无关。科尔勒很久以前就观察到了相同两个物种之间互交结果的差异。举一个例子，紫茉莉可以很容易地被长筒紫茉莉的花粉授精，而且这样产生的杂种是完全可育的。但是在接下来的八年中，科尔勒尝试了200次以上，试图以长筒紫茉莉的花粉让紫茉莉受精，却失败了。可以给出其他几个同样引人注目的案例。瑟伦在某些海藻，即墨角藻属里，也观察到了相同的事实。此外，盖特纳发现，互交的难易程度不同极为普遍。他甚至在亲缘很近的类型之间（如一年生紫罗兰和无毛紫罗兰）都观察到了这种现象，而许多植物学家仅将它们归类为变种。另一个值得注意的事实是，互交产生的杂种虽然是由两个相同物种产生的，但一个物种先被用作父本，然后又被用作母木，虽然外部形状差异很小，但其可育性通常有所不同，偶尔差异还很大。

从盖特纳的工作还可以得出其他一些奇妙的规则。例如，某些物种具有与其他物种杂交的显著能力；同一属的其他物种能使杂种后代与其特别相似，但是这两种能力并不一定完全伴随在一起。有些杂种并非具有两个亲种的中间性状，而总是非常像其中一个。这些杂种尽管外表像它们的纯粹亲种一样，但除了极少数外，都是极不育的。此外，在那些通常具有其父母之间的中间构造的杂种中，有时又会产生出例外和异常的个体，它们非常像其纯粹的亲种之一；而且这些杂种几乎总是完全不育的。这些事实表明，杂种中的完全可育性与它和任一纯粹亲种的外在相似性无关。

考虑到关于初次杂交和杂种可育性的规律，我们可以发现，当被视为真正不同的物种之间进行杂交时，它们的可育性会从零逐渐变为完全可育，甚至在某些条件下还会超常可育。它们的可育性除了极易受到有利和不利条件的影响外，还具有天生的可变性。初次杂交以及从该杂交产生的杂种，可育程度绝不总是相同的。杂种的可育性与它们与父母双方外观的相似程度无关。最后，在任何两个物种之间进行首次杂交的难易度，并不总是由它们之间的亲缘关系或相似度决定的。相同两个物种之间的互交清楚地证明了后一种说法，因为把一个物种或另一个物种用作父本或母亲，杂交的难易度通常都存在一些差异，有时存在着极大的

差异。此外，由互交所产生的杂种的可育性也常常不同。

现在，这些复杂而奇异的规律是否表明，赋予物种不育的目的仅仅是为了防止其在自然界中混杂在一起？我觉得不是。如果避免物种混杂在一起对各物种都同样重要的话，为什么当各个物种杂交时，不育的程度会如此巨大呢？为什么在同一物种的个体中，可育程度会发生变化？为什么有些易于杂交的物种却又会产生非常不育的杂种；而那些和其他物种杂交极度困难的物种，却产生了相当可育的杂种？为什么同样两个物种之间的互交结果经常会有如此大的差异？为什么允许杂种产生呢？让物种具有产生杂种的特殊能力，然后又通过不同程度的不育来阻止其进一步繁殖，并且这与它们父母之间的初次杂交并不严格相关，这似乎不太合理。

另一方面，上述规律和事实在我看来似乎清楚地表明，首次杂交和杂种的不育都只是偶然发生的，主要取决于所杂交物种在生殖系统中的未知差异。这种差异是如此独特且严格限定，因此在两个物种之间互交时，一个物种的雄性生殖质通常会完全地作用于另一个物种的雌性生殖质，但反过来却不会。最好通过一个例子来更全面地解释我的意思，即不育是由于其他差异产生的，而不是被特殊赋予的品质。一棵植物在自然状态下，嫁接或芽接的能力对其生存来说完全不重要，有人会认为这种能力是由两种植物生长规律的差异偶然产生的。从树的生长速度、木材的硬度、树液的流动或性质方面，我们有时可以看到一棵树不能嫁接到另一棵树上的原因。但在许多情况下，我们无法给出任何理由。两种植物的大小差异很大，一种是木本的，另一种是草本的；一种是常绿的，另一种是落叶的，并且适应不同的气候，但并不能总是阻止两种植物嫁接在一起。与杂交一样，嫁接也受到亲缘关系的限制，因为没有人能够将属于不同科的树木嫁接在一起。另一方面，通常可以但并非总是很容易将近缘物种和同一物种的变种嫁接在一起。但是，这种能力就像杂交一样，绝不是仅仅受亲缘关系支配的。尽管同一科中的许多不同属已被嫁接在一起，但在其他情况下，同一属的不同物种却不能相互嫁接。相比同一属的苹果，梨可以更容易地嫁接到不同属的榅桲树上。甚至不同品种的梨嫁接到榅桲树上的难易程度也不同。杏和桃树的不同变种嫁接到某些李子树的变种上时，也是如此。

正如盖特纳所发现的那样，有时在相同两个物种的不同个体之间存在先天差异。因此，萨加里特认为，将同一个物种的两个不同个体嫁接在一起的情况也是如此。就像在互交中一样，相互嫁接的难易程度通常也很不相同。例如，普通的醋栗不能嫁接到黑醋栗上，而黑醋栗却可以接在普通醋栗上。

我们已经看到，生殖器官处于不完善状态的杂种的不育性，与两个具有完美生殖器官的纯种难以杂交的不育性，有很大的不同。然而，这两种不同的情况在一定程度上是类似的。 在嫁接中会发生类似的事情。索因发现了三种刺槐属物种，它们可以在其根部大量地结子，并且可以很容易地嫁接到其他刺槐属物种上，但如此嫁接会变得不育。另一方面，某些花楸属的物种嫁接到其他花楸属物种上时，其结子量是其自身根系的两倍。后一个事实使我们想起了朱顶红、西番莲等属的特殊情况，当用不同物种的花粉授精时，其产生种子的数量要比本株花粉授精时产生的种子多得多。

因此，我们可以看到，尽管嫁接与雌雄生殖质的结合之间存在明显而巨大的差异，但不同物种嫁接和杂交所得到的结果却大致相似。而且，由于我们认为支配树木嫁接难易的规则是由于它们的营养系统存在未知的差异而产生的，因此应该相信，决定初次杂交难易度的更为复杂的规律主要是由其生殖系统的未知差异而产生的。在这两种情况下，就如我们所预料的，这些差异都在一定程度上遵循了系统的亲缘关系法则。通过这种亲缘关系，可以表明一切生物之间的各种相似和不同。在我看来，这些事实绝不表明嫁接或杂交各个物种的难易度是一种特殊赋予。尽管在杂交的情况下，这种困难对于物种特定形态的维持和稳定非常重要，而在嫁接的情况下，难易度对于它们的生存并不重要。

初次杂交不育性和杂种不育性的起因

在过去一段时间里，我曾和其他人一样，认为初次杂交以及杂种的不育性可能是自然选择作用让可育性的程度逐渐降低而缓慢获得的；并认为微小的可育性降低与其他任何变异一样，在一个变种的某些个体和另一变种的某些个体杂交时会自发地产生。然而事实并非如此。对两个变种或早期物种，若能将它们彼此区分开来，对它们肯定都是有利的。

根据同样原理，人们同时选择两个变种时，就应该把它们彼此隔离开。首先，可以看到，在不同栖息地的物种间杂交，通常都是不育的；很明显，这种杂交对这些物种没有什么好处。因而，杂交不育肯定不能通过自然选择而产生。这也许说明了，如果一个物种与同一地区的其他物种杂交会产生不育，那么其他物种杂交必然也会产生不育。其次，在互交中，第一种生物的雄性生殖质无法使第二种生物受精，而与此同时，第二种生物的雄性生殖质却能使第一种生物大量受精，这种情况违反了特创论，也不符合自然选择的学说，因为生殖系统这种奇异的状态对所有生物几乎都没有任何好处。

如果认为自然选择作用可能影响物种杂交不育，最大的难点在于，从轻微降低的不育性到完全不育性之间应该存在许多逐级演化的过程。一个初期物种，如果与亲种或某一其他变种杂交而具有某种程度的轻微不育，就能说明这对初期物种是有利的，因为这样便可以避免产生一些不纯的和退化的后代，以便它们的血统与正在形成过程中的新种区分开来。但是，谁要是不厌其烦来思考这些过程，即通过自然选择，从最低程度的不育性而逐渐增强达到许多物种共有的，以及已分化为不同属和不同科物种所具有的高度不育性，便会发现这一问题是非常复杂的。经过反复思考之后，我认为通过自然选择作用应该不可能产生不育。

现以任意两个物种杂交可产生少数不育的后代为例，偶尔有一些个体被赋予了略微高一些的不育性，并由此前进一小步，走向完全不育，这对于那些个体的生存到底有什么好处呢？如果自然选择的学说在此适用，那么这种增强必定会在许多物种中不断地发生，因为大部分物种彼此是相当不育的。对于不育的中性昆虫，我们可以认为，其构造和育性上的变异是通过自然选择作用逐渐累积起来的，由此能够间接地使该类群比其他同种类群更占优势。但是一个非群体生活的动物，若某些个体与其他某一变种杂交而使它稍微不育，是不可能获得任何好处的，也不会间接地给同一变种别的个体带来什么好处，而使它们能够留存下来。

但是，没有必要再认真讨论这一问题了，因为对于植物，我们已经得到了确切的证据，证明杂交物种的不育性肯定是由与自然选择无关的某种原理引起的。盖特纳和凯洛依德已经证明，在含有许多物种的属内，不同物种间杂交可形成一个由结子数量逐渐变少直到不结子的系

列，但后者可能会受某些别的物种花粉的影响，使其子房膨大起来。很显然，不能选择比那些已经不结子的个体更为不育的个体。因此，这种极端不育性只对胚胎造成了影响，是无法通过选择作用获得的。而且由于支配各种不育程度的规则在动植物界是一样的，我们便能够推断，无论不育性的起因是什么，在任何情况下，它都是相同的或近乎相同的。

现在，我们会更仔细地研究首次杂交和杂种不育的可能原因。即使在初次杂交中，杂交和获得后代的难易度显然也取决于几个不同的原因。有时雄性元素的天然因素使其无法到达胚珠，就像雌蕊长的植物花粉管不能到达子房那样。还已经观察到，当将一种花粉放在另一个远缘物种的柱头上时，尽管花粉管会伸出，但它们不能穿透柱头表面。同样，雄性生殖质可能会到达雌性生殖质，但无法使胚胎发育，就像瑟伦对墨角藻进行的一些实验一样。对于这些事实，和为什么某些树木无法嫁接到其他树木上一样，无法给出解释。最后，胚胎可能发育，然后在早期死亡。这一种情况没有得到足够的重视；但是根据在雉和家鸡的杂交上颇有经验的休伊特先生的观察结果来看，我相信，胚胎的早期死亡是促使杂交不育的一个常见原因。起初我非常不愿意相信这种观点。最近，萨尔特先生发表了他的一个研究结果，由鸡属的三个不同物种和它们的杂种之间的各种杂交产下的约500个蛋，其中大部分都已受精。然而大部分受精卵，要么在胚胎发育过程中死亡，要么虽然快要发育成熟，雏鸡却不能啄破蛋壳。在孵出来的小鸡中，有4/5以上的个体在最初几天或几个星期内死亡。“没有任何明显的原因，只是由于它们缺乏生存的能力”。最终，通过这500个蛋仅仅育出12只鸡。植物的杂交胚胎常常也会以同样的方式夭折。我们已经知道，由差异极大的物种杂交产生的杂种，常常是虚弱和矮小的，而且会在早期死亡。关于这类事实，马克斯·威丘拉最近提供了一些有关杂种卵的显著例子。其中值得注意的是孤雌生殖的某些情况，未受精的蚕卵，其胚胎在早期发育后就像不同物种杂交的胚胎一样随即死亡。在不清楚这些事实以前，我一直认为杂种的胚胎不会在早期死亡，因为杂种一旦产生，例如我们所见到的骡子，往往是健康长寿的。然而并不是所有杂种在它出生前后所处的环境都是相同的。若出生和生长在双亲生活的地方，其环境条件往往是适合它们的。但是，如果一个杂种只有一半的属性和体质是来自母体的，那么在出生之前，还在母体的子宫内或卵和种子内被养育的时候，可能就已处

于不适合的条件之下了，通常就容易早夭，因为所有极其幼小的生物，对于有害的或不正常的生存状态都是极其敏感的。但是总体来看，与它此后所处的环境条件相比，胚体早夭更重要的原因可能是原先受精作用中的某些缺陷，从而导致胚胎不能完全发育。

关于两性生殖质发育不完全的杂种不育，情况则大不相同。我已经不止一次提到我搜集到的大量事实，表明当动植物从自然条件下移出时，极有可能严重影响其生殖系统。实际上，这是阻止动物驯化的重大障碍。在由此诱发的不育与杂种的不育之间，有许多相似之处。在这两种情况下，不育都与整体健康无关，并且通常伴随着体形过大或过分茂盛。在这两种情况下，不育性的程度均不同，雄性生殖质最容易受到影响，但是有时候雌性生殖质比雄性生殖质受到的影响更大。两种情况下，不育性都与系统亲缘关系有一定程度的关联，或者由于相同的异常条件使整个动植物群变得不育，因为整个类群都倾向于产生不育的杂种。另一方面，一个类群中的某个物种有时会抵御巨大的环境变化，同时生育力没有受到损害。而且在同一个类群中的某些物种会产生异常可育的杂种。在尝试之前，没有人能确定，任何特定的动物是否会在封闭条件下繁殖，或任何植物在人工栽培下可以自由地结子。在尝试之前，也没有人能确定，一个属的任何两个物种是否会产生或多或少的不育杂种。最后，当生物在连续数代都处于非正常条件下时，它们极易变异。我认为，之所以会这样，是因为它们的生殖系统受到了特别的影响，尽管其影响程度要比不育发生时低。杂种也是如此，因为每个实验者都观察到，它们的后代很容易发生变异。

因此我们可以知道，当生物处在新的异常条件下，并且当两个物种勉强杂交产生杂种时，生殖系统与总体健康状况无关，而是以非常相似的方式受到不育的影响。在前一种情况下，存活条件受到了干扰，尽管常常程度小到使我们无法觉察；在后一种情况下，虽然外部条件保持不变，但是该杂种的体质因是由两个不同的体质、构造和生殖系统混合而成而受到干扰。由于杂种是由两种不同的体质结合而成的，所以在发育、周期性活动以及不同部位和器官的相互关系等方面都会受到干扰。当杂种能够自由交配时，它们便可以将这种组合体质代代相传给后代，因此它们的不育性在一定程度上会发生变化，但不会消失，甚至还有可

能增强。如前所述，不育性的增强，是由近亲繁殖所导致的普遍结果。马·威丘拉就极力支持上述的杂种不育性是由两种体质合二为一所引起的观点。

但是必须承认，依据上述或其他的观点，我们无法理解关于杂种不育性的若干事实。例如，互交产生的杂种的育性不平等；或那些偶尔或异常类似于纯亲种的杂种的不育性的增加。我无法确定，上述说法是问题的根源，其无法提供任何解释说明为什么将生物置于异常环境中会变得不育。我试图证明的是，在两种情况下，在某些方面，不育是常见的结果：一种是由于生存条件受到干扰，另一种是由于两种体质合二为一而受到了干扰。

同样的现象也适用于相关但又非常不同的一类事实。我认为这是一种古老而几乎普遍的信念，即有大量证据表明，生存条件的轻微变化对所有生物都是有利的。我们看到农民和园丁常常把块茎或者种子从一种土壤或气候换到另一种土壤或气候，然后再换回来。在动物生病后的康复期间，我们清楚地看到，生活习惯上的任何改变几乎都可以带来巨大的好处。同样，对于动植物，也有大量证据表明，同一物种不同个体之间杂交后代的生命力和繁殖力都增强了。与此相反，近亲之间连续数代的杂交，特别是如果将它们保持在相同的生存条件下，则总是会导致后代的衰弱和不育。

由此看来，一方面，生存条件的轻微变化有益于所有生物；另一方面，这种轻微的杂交，也就是同一物种的雄性和雌性处在略微不同的生活环境中，或者同一物种有略微差异的变种之间的杂交，会增强后代的生命力和繁殖力。但是我们已经看到，自然条件下生活的物种，一旦处于变化十分大的环境中，如在圈养下，常常会使生物在某种程度上变得不育。而且我们还知道，更大的杂交，即血缘相差很远或具有种级差异的雄性和雌性之间的杂交，通常会产生在某种程度上不育的杂种。我不能说服自己这种双重的平行关系是偶然或错觉。如果可以解释，为什么大象和其他许多动物在当地即使是在不完全圈养的条件下，也不能繁殖，那么便能弄清楚杂种如此普遍不育的根本原因；同时也能够解释，为什么通常处于新的和不同条件下的某些家养动物品种杂交时却相当可育，尽管它们源自不同的物种，并且这些物种在最初杂交时可能是不育

的。这两个系列的事实似乎是通过某种共同但未知的纽带联系在一起的，这种纽带本质上与生命原理有关。据斯宾塞先生说，这一原理指的是，在整个自然界中，决定或存在于生命中的各种力量的不断作用和反作用总是趋向于平衡的；当任何变化轻微地扰乱了这一平衡时，生命力就会增强。

交互的两型性和三型性

这里对此问题进行简要讨论，便发现会对杂种性质的理解提供一些说明。属于不同目的若干植物表现出两种类型，即两型性，它们的数量大致相同，仅仅在生殖器官上存在差异：一种类型的雌蕊长、雄蕊短，另一种则相反；而且两种类型的花粉粒大小也不一样。至于三型性植物，有三种不同的类型，在雌蕊和雄蕊的长短、花粉粒的大小和颜色以及其他方面也不同；而且每一类型都有两组雄蕊，所以三种类型共有6组雄蕊和3种雌蕊。这些器官相互在长度上非常匀称，两种类型的一半雄蕊的高度与第三种类型的雌蕊恰好相等。我曾经说明，要使这些植物完全可育，就必须用一种类型对应高度的雄蕊上的花粉对另一种类型的柱头授精，这点已经被其他观察者所证实。所以对于二型性的物种，有两种结合是合理且完全可育的，而另两种结合是不合理且有某种程度的不育。对于三型性物种，则有6种结合是合理且完全可育的，而有12种结合是不合理且有某种程度的不育。

若对各种不同的二型性和三型性植物进行不合理的授粉，即用高度不相配的雄蕊给雌蕊上的花粉授粉时，便可以观察程度变化很大的不育性，一直到彻底的、完全的不育；正好与不同物种杂交中的情况一样。由于在后一种情况下，不育的程度取决于生存条件的适合程度，因此我认为不合理的结合也是一样。众所周知，如果将其他物种的花粉放在一朵花的柱头上，然后，即使在相当长的一段时间后，把自身花粉再放到这个柱头上，它的作用优势仍然非常明显，通常可以达到歼灭外来花粉的效果。同一物种不同类型的花粉也是如此。合适的花粉和不合适的花粉被放在同一柱头上时，前者比后者的优势更强大。好几朵花的授粉情况证明了这一点，首先我对花朵进行不合适的授粉，24小时后，再用一种具有特殊颜色的变种花粉进行合适的授粉，结果所有幼苗都表现出了

与其类似的颜色。这表明，即使在24小时之后才授以合适的花粉，它仍能完全破坏或阻止先前授以的不合适花粉的作用。就好像相同的两个物种互交，经常会得到很不同的结果，三型性植物也一样。例如，紫色千屈菜的中花柱类型，可以很容易就使用短花柱类型的长雄蕊上的花粉进行不合适授精，而且可以产生大量种子。但是当用中花柱类型的长雄蕊上的花粉来使短花柱类型的植株受精时，却无法产生一粒种子。

在所有这些情况下以及其他一些情况下，同一物种不同类型之间的不合适结合，与两个不同物种杂交的情形完全相同。因此，我用四年时间认真地观察了由几种不合适的结合产生的许多幼苗，并得出了结果：这些所谓的不合适的植株，都不是充分可育的。我们能够由二型性的物种培育出长花柱型和短花柱型两种不合适的植物，也可由三型性的植物培养出所有三种不合适的类型。培育出的这些类型都能够以合适的方式正确结合。若做到这一点，就很容易理解，为什么这些植物所产生的种子不比它们双亲在合适受精时所产生的种子多。但事实并不是这样，这些植株都具有不同程度的不育；有些不育非常极端且无法改变，以至在四年中从来没有结过一粒种子，有时甚至只是一个空蒴。当这些不合适的植株之间进行合适的结合时，它们的不育性与杂种相互杂交时的不育性是完全一致的。另一方面，如果一个杂种与任意一个纯亲种杂交，其不育性通常会大大降低；若一种不合适的植株与一种合适的植株受精，结果也一样。就像杂种的不育性与两个亲种初次杂交的难易度并非总是一致的一样，某些不合适的植物是非常不育的，但产生它们的那一种结合的不育性却不一定很小。用同一蒴果培育出的杂种之间的不育性程度存在着内在差异，很明显，不合适的植物也是如此。最后，许多杂种开的花繁茂而持久，而其他不育性较大的杂种，不仅开花很少，而且非常弱小，类似的情形在各种两型性和三型性的不合适后代中也出现过。

总之，不管在性状上还是在行为上，不合适植物和杂种之间都非常相似。换句话说，不合适的植物就是杂种，这种说法并不夸张，只不过这样的杂种是由相同物种的某些类型的不合适结合形成的，而普通杂种是通过不同物种间的不合适结合形成的。我们也发现了，初次不合适结合与不同物种次杂交之间存在着许多相似性。通过以下例子来说明这一点，也许会更加清楚。我们假定，有一位植物学家发现了三型性紫色千

屈菜的长花柱类型有两个明显的变种（事实的确如此），并打算用杂交的方法来确定它们是否属于不同的物种。结果可能会发现，它们所结出的种子大约只有正常数量的1/5，并且在别的方面表现的好像是两个不同的物种。但是要确定这种情况，还需要把假定的杂交种子培育为植株，那么就会发现，这些植株矮小得可怜且极其不育，并且在其他各方面都表现得与普通杂种一样。这样，他便会根据一般的标准，确定已经证明了这两个变种是真正的不同物种。然而，他完全错了。

上述关于两型性和三型性植物的事实都很重要，首先，因为它们说明了，对初次杂交以及杂种可育性降低的生理测试并不能作为区分物种的可靠标准；其次，因为我们可以断定， 在不合适结合的不育性与它们不合适后代的不育性之间，一定存在着某种未知的纽带将它们连接起来，而且使我们把同样的看法延伸到了初次杂交和杂种的不育性上；再次，因为我们知道，同一物种可能存在着两种或三种不同的类型，它们与外界环境的相关构造和体质都是相同的，但是如果以某些方式结合则会不育，在我看来，这一点似乎特别重要。因为我们不要忘记了，形成不育的，恰好就是相同类型两个个体的雌雄生殖质的结合，如两个长花柱类型植株的雌雄生殖质的结合；而造成可育的，却是两个不同类型个体的雌雄生殖质的特定结合。因此，乍一看，这种情况似乎正好与同种个体的一般结合以及不同物种杂交中的情况相反。然而是否真的如此，还不能确定，但我不想继续详细讨论这个含糊不清的问题。

然而，通过分析两型性和三型性的植物，我们可以推断，不同物种杂交的不育性和它们杂种子代的不育性，与它们的构造上和一般体质上的一切差异都无关，可能只取决于雌雄生殖质的性质。通过对互交的分析，我们也可以得出相同的结论。在互交中，一个物种的雄性不能或很难与第二个物种的雌性杂交，而其反过来杂交却很容易。那位杰出的观察家盖特纳也得出了同样的结论：物种间杂交的不育性，只是由于它们的生殖系统存在差异。

并非所有变种杂交和其混种后代都是可育的

由于无法辩驳的论据，我们必须承认，在物种和变种之间一定有一些本质上的差别，因为无论变种在外观上有多大差异，都很容易进行杂

交，并产生完全可育的后代。我完全承认这是第一种规则，除了下面几个例子之外。但是，如果我们面对自然条件下产生的变种，我们将立即陷入绝望的困境。因为如果两个公认的变种在杂交时被发现有某种程度上的不育，那么大多数博物学家会立即将它们列为物种。例如，盖特纳说，红色和蓝色两种蘩缕被大多数植物学家列为不同变种，它们之间的杂交可育性很低，因此他将它们列为毫无疑问的物种。因此，照此循环论证下去，我们就必须承认自然条件下产生的所有变种的可育性。

如果我们转向家养条件下已经产生或假设已经产生的变种，仍然会产生疑问。例如，当说到某些南美本土的家犬不容易与欧洲犬杂交时，每个人都会这样解释，并且也可能是真正的原因，即这些狗是从几个不同的土著犬种中繁衍出来的。然而，如此众多的家养品种，例如鸽子或甘蓝，虽然在外观上差异很大，却具有完美的育性，这是一个很明显的事实；尤其是我们发现尽管有很多物种彼此很相似，但相互杂交后却完全不育。不过，通过下面几点分析，我们就可以知道家养品种的具有可育性不是奇怪的事情。首先，我们可以清楚地看到，仅仅外观的相似性并不能决定两个物种之间杂交时的不育程度，家养变种也适用相同的规则。其次，对于物种，其原因肯定完全在于它们生殖系统的差异。改变家养动物和栽培植物的环境条件，很少能够引起相互不育的生殖系统的变化。因此我们有理由相信与此正好相反的帕拉斯的学说，即家养条件往往会消除后代杂种的不育性；因此在自然状态下，杂交可能会产生某种程度不育的物种，它们的家养后代进行杂交后却会变成完全可育。再次，对于植物，人工栽培避免了不同物种之间产生不育的倾向，但在前面所述的若干确实有据的例子里，有些植物却与此相反，因为它们已变为自交不育，同时却仍然可以使其他物种授精，或能被其他物种授精。如果我们认同帕拉斯的学说，即经过长期连续的家养便可消除不育性（实际上很难加以反驳），那么，长期生活在相同环境下也可诱发不育性的倾向便成为极不可能的了，即使在某些情况下，偶尔也会有体质特殊的物种因此产生不育性。于是我们就能够明白，为什么家养的动物不会产生彼此不育的变种；而植物就像我即将谈到的，只发现了极少数这种情况。

在我看来，该问题真正的难点似乎并不是为什么家养变种在杂交时

没有变为彼此不育，而是在自然环境下，一旦变种经过长久的变异成为物种时，为什么反而会具有普遍的不育性。我们还无法弄清楚其真正的原因，所以当我们发现对我们生殖系统的正常作用和异常作用还是这样一无所知时，也就没有什么可奇怪的了。但可以知道的是，自然物种与无数竞争者进行了生存斗争，比家养变种更长时间处于一致的环境中，因此便产生了迥异的结果。当野生动植物离开它们生活的自然环境而被家养或人工栽培时，通常就会使其变得不育；而且一直在自然环境下生活的生物，它们的生殖功能对于非自然杂交所产生的影响或许也是非常敏感的。而家养生物则不一样，就像仅由它们被家养这一事实来看，它们对生存条件的变化已经不会高度敏感了，而且现在通常足以抵御反复变化的生存条件，同时不会降低其可育性。因此可以预测，家养条件下产生的变种，在与家养条件下起源的其他变种杂交时，它们的生殖能力不太会受到这种杂交作用的不利影响。

好像我还没有说过，同一物种的变种杂交时总是可育的这个问题。但是在我看来，在以下几种情况下，无法否认存在一定程度的不育的证据，我将对此进行简要的说明。这种证据至少与我们相信众多物种不育的证据一样有用。证据也来自反对者，在所有其他情况下，他们都将可育和不育视为区别变种的可靠标准。盖特纳几年来在自己的花园里种植着矮秆黄籽粒玉米和高秆红籽粒玉米，并且植株之间相距很近；尽管这些植物都是雌雄异花，但它们从未自然杂交过。然后，他用一种玉米的花粉对另外一种玉米的13朵花授粉。但是只有一个果穗能结籽，而且只结出了5粒种子。这种情况下的人工授粉一般不会造成损害，因为植物是雌雄异花的。我相信，没有人怀疑这些玉米品种属于不同的物种；更需要注意的是，这样培育的杂种本身是完全可育的。因此，即使是盖特纳也没有冒险将这两个变种视为不同的物种。

别沙连格曾对三个不同的葫芦品种进行杂交，葫芦就像玉米一样是雌雄异花的，他断定，相互之间的受精难易度与它们之间的差异是有关系的，差异越大就越难受精。我不知道这些实验的可信度如何，但是萨加里特主要根据不育性实验的分类方式，把实验的这几种葫芦都列为变种，而且劳丁也得出了一样的结论。

下面的情况更加引人注目，尽管起初看起来非常不可思议，但这是

杰出的观察家和坚决的反对者盖尔纳先生多年来对9种毛蕊花物种进行无数次实验后得出的结果，即相同颜色的变种杂交产生的种子要比黄色和白色变种在杂交时产生的种子多；而且他断言，当一个物种的黄色和白色变种与不同物种的黄色和白色变种杂交时，相同颜色的花朵之间的杂交比不同颜色的花朵之间的杂交产生的种子更多。斯科特先生也对毛蕊花属的物种和变种进行了实验，虽然没能证明盖特纳关于不同物种杂交的结果，但却发现同一物种的不同花色变种的杂交，要比同花色变种杂交结的种子少，其比例为86:100。然而，这些变种，除了花的颜色外没有其他区别；而且有时可以从某一种变种中结出另一种的种子。

凯洛依德工作的准确性得到了后来每一个观察者的证实。他曾证明了一个引人注意的事实，当与非常不同的物种杂交时，普通烟草中的一种特殊变种比其他变种的可育性更高。他用最严格的方式即互交，对五个公认的变种进行实验，发现它们的杂种后代都是完全可育的。但是，这五个变种中的一个，无论是作为父系还是作为母系，与黏性烟草这一物种杂交后产生的杂种总会比其他四个变种产生的杂种的不育性更低。因此，这一变种的生殖系统必然已经以某种方式发生了某种程度的变异。

根据这些事实，便不能再坚持认为变种间杂交总是相当可育的了。由于在自然状态下确定变种的不育性的困难很大，如果公认的变种有任何程度的不育，通常都会被列为物种。对于家养变种，人们通常也只注意其外部性状，并且这些变种也没有长时间在同样的环境下生活。考虑到这些事实，我认为杂交的可育性并不是变种和物种之间的根本区别。在我看来，物种间杂交的不育不是一种特殊赋予或者特别获得的属性，而是伴随着发生在生殖系统的一种未知变化而产生的属性。

除育性外，杂种和混种的比较

除了可育性之外，还可以在其他几个方面比较物种杂交的后代和变种杂交的后代。盖特纳渴望在物种和变种之间划清界限，然而他在物种杂交的后代和变种杂交的后代之间只能找到很少的差异，我认为这些差异都不重要。相反，这二者的后代在很多重要方面都非常接近。

我将在此简短地讨论一下这个问题。最重要的区别是，在第一代中，混种比杂种更容易变异。但是盖特纳承认，长期栽培的物种杂交产生的杂种在第一代中常常会发生变异。而且我自己也看到了这一事实的惊人实例。盖特纳进一步承认，与非常独特的物种相比，非常近缘的物种之间杂交产生的杂种更容易变异。这表明变异程度的差异会逐渐消失。当混种和更可育的杂种各自繁殖数代后，其后代的极高变异性是众所周知的。在少数情况下，混种和杂种都可以长期保持性状一致，但是混种在后继世代中的变异性可能比杂种大。

混种的变异性比杂种大，这似乎完全不足为奇。因为混种的双亲都是变种，而且大部分是家养的变种（很少用自然变种做实验），这就说明变种的变异性是近期出现的，而且意味着杂交作用产生的变异还会继续下去，并且会增强。杂种在第一世代的变异性比在后继世代中变异性要小，这种奇特的事实值得注意。因为这与我提出的引起普通变异性的一种原因是相关联的；就是说，由于生殖系统对生活环境的变化特别敏感，因此在这种情况下，便不能利用其正常的功能，产生出在各方面都非常类似亲种类型的后代。由于亲种（除经过长期培养的物种）的生殖系统没有受过任何影响，因此所产生的第一代杂种不容易发生变异；但是杂种本身的生殖系统已经受到了巨大的影响，因此它们的后代容易发生高度的变异。

现在来比较一下混种和杂种。盖特纳说，混种比杂种更容易再现双亲中的任意一种类型。如果真是这样，也只不过是程度上的差异。盖特纳还特意强调，长期栽培植物的杂种要比自然状态下产生的杂种更容易出现返祖现象。这也许可以解释，为什么不同的观察者所得出的结果大相径庭。威丘拉曾用柳树的野生种做过实验，他怀疑杂种是否可以再现其亲本类型的性状。相反，劳丁却坚决认为，杂种的返祖几乎是一种普遍的现象，其实验对象主要是栽培植物。盖特纳进一步认为，如果任意两个十分相似的物种分别与第三个物种杂交，所产生的杂种相互差别会很大；但是如果同一物种的两个迥然不同的变种分别与另一物种杂交，所产生的杂种则没有太大的差异。据我了解，这一结论建立在单次实验的基础上，而且好像和盖特纳多次实验的结果正好相反。

盖特纳所指出的杂种和混种植物之间的差异，只不过是一些不重要

的差异。另一方面，按照盖特纳的看法，混种和杂种，尤其在近缘物种间产生的杂种，与它们各自亲本的相似程度和性质同样遵循这一规则。当两个物种杂交时，有时其中一个物种具有一种优势，可以优先将自己的性状遗传给杂种。我认为植物的变种也是如此，对于动物，两个变种杂交时，必然也有一个变种具有这种优先遗传的优势。由互交产生的杂种植物，通常彼此非常相似；互交产生的混种植物也是如此。不管是杂种还是混种，通过在后继世代中与任意一个纯粹的亲种连续杂交，都可能让它重现该亲本类型的性状。

这几个观点显然也适用于动物。但是对于动物，这个问题过于复杂，部分原因是动物存在次级性征；但更特别的是，当两个物种或两个变种杂交时，一种性别传递本身特征的优势比另一种性别更强。例如，我认为那些主张驴比马更具有优先遗传能力的学者是对的，因为驴和马形成的杂种更像驴。但是，母驴的优先遗传能力比公驴要弱，因此公驴与母马的后代要比母驴与公马的后代更像驴。

一些作者非常强调这样的事实，即混种后代只与亲本中的一个非常接近，不存在中间性状，在杂种后代中有时也会发生这种情况。但是我认为，与混种相比，杂种后代发生的频率要低得多。考虑到我搜集的杂种与一个亲种非常相似的案例，这些相似之处似乎主要限于性质上近乎畸形，而且是突然出现的那些性状。例如，白化病、黑化病、尾巴或角缺失，或者多余的手指和脚趾，大都与通过自然选择缓慢获得的性状无关。与杂种相比，混种突然完全重现任一亲种性状的倾向要大得多，因为混种经常是由突然产生且性状为半畸形的变种繁衍而来的，而杂种是由缓慢而自然产生的物种繁衍而来的。总的来说，我完全同意卢卡斯博士的看法，他在对与动物相关的事实进行了大量整理后得出结论，即子代与亲种的相似原则是相同的，无论双亲差异是否巨大，即无论是相同变种或不同变种，还是不同物种个体间的交配，都是如此。

撇开可育和不育这个问题，在所有其他方面，物种杂交的后代和变种杂交的后代都具有普遍相似之处。如果我们将物种视为上帝特别创造的，并将变种视为由次要法则产生的话，那么这种相似性将是一个惊人的事实。但是，它与物种和变种之间没有本质区别的观点非常相符。

摘要

足够被列为不同物种的生物之间的初次杂交，以及它们的杂种的不育性非常普遍，但不是全部不育。不育程度各有不同，而且往往相差甚小，以至于曾经有过两个最细心的实验家，通过这项测试在分类上得出了截然相反的结论。不育在同一物种的不同个体中具有天生的可变性，并且非常容易受到有利和不利条件的影响。不育程度并不严格遵循亲缘关系规则，而是由一些奇妙而复杂的规则所决定的。在相同两个物种之间的互交中，不育性通常是不同的，有时甚至是很大的不同。初次杂交以及从该杂交中产生的杂种，不育的程度也有所差别。

嫁接树木时，一个物种或变种嫁接于另一物种的能力，通常取决于它们的营养系统未知的差异。与此相同，在杂交时，一个物种与另一个物种杂交的难易度，取决于生殖系统未知的差异。因此，没有更多的理由认为，物种被赋予了不同程度的不育性以防止它们在自然界中杂交和混淆；也没有理由认为，树木被赋予各种各样不同程度的嫁接难度是为了防止它们在森林中互相接枝。

初次杂交的不育性和杂种的不育性不是经过自然选择作用获得的。初次杂交的不育性似乎取决于多种情况。在某些情况下，很大程度上取决于胚胎的早期死亡。杂种的不育性，主要是由于两种不同的生物类型组合，干扰了它们整个体质的组成。这种不育性与纯粹物种因为异常的新生活环境的影响而产生的不育性非常相似。只要能解释后一种不育性，就能够解释杂种的不育性。这种观点得到了另一种平行事实的有力支持。这种平行事实是：第一，生存条件的轻微变化显然有利于所有生物的生命力和繁殖力；第二，在不同环境下生活的或略微变异的生物类型之间的杂交，有利于它们后代的个体大、生命力和可育性。前文所列举的两型性和三型性的不合理结合的不育性，以及它们不合理后代的不育性的相关实例，也许能够说明，在任何情况下都可能存在某种未知的纽带，把初次结合的可育性程度和它们后代的可育性程度联系在一起。研究有关二型性的事实以及互交的结果，会清晰地得出这样的结论：杂交物种不育性的主要原因是物种生殖质的差异。但是，有一点我们还未弄清楚，那就是为什么在不同物种杂交时，生殖质会如此普遍地发生或

多或少的变异，进而引起了它们的彼此不育。这似乎与物种长期生活在近乎一致的生活环境中有关。

由于不同的原因，两个物种杂交的困难程度与它们的杂种后代的不育程度通常应该是一致的。这也不足为奇，因为两者都取决于所杂交物种之间某种差异量。初次杂交的难易程度、杂种的可育性以及嫁接在一起的能力（尽管后者的能力显然取决于极不同的情况），都应该在一定程度上与实验类型在系统中的亲缘关系相对应，因为分类系统的亲缘关系包括了所有类型之间的各种相似性。

已知为变种或足够相似到被视为变种的类型之间的初次杂交，以及它们的混种后代，一般都是可育的，但并非全部如此。假如我们还记得，我们循环论证处于自然状态下的变种；假如我们还记得，更多的变种是在家养条件下通过单纯选择的外部差异而产生的，并且没有长期生活在一致的环境中，那么，变种具有如此普遍和完美的可育性就不足为奇了。我们特别应该牢记，长期连续的家养具有消除不育性的倾向，因此这似乎不可能引起不育。除可育性外，在所有其他方面，杂种和混种之间都有非常密切且普遍的相似之处，例如在变异性上，在多次杂交中相互结合的能力上，在遗传两性亲种的性状上，都极为相似。最后，虽然我们既不清楚为什么动植物离开其自然环境后就会变为不育，也不清楚初次杂交和杂种不育性的确切原因，但是在我看来，本章中简要介绍的事实似乎与物种来源于变种这一观点是一致的。

第十章：地质记录的不完整

现代生物中缺少变种

在第六章中，我列举了反对本书观点的主要意见，现在已经讨论了其中的大多数。但是一个是很明显的难题没有解决，那就是为什么物种之间界限分明，为什么它们没有通过无数的过渡类型联结在一起？在广袤相连的大陆上，自然地理条件的逐渐变化对过渡类型的存在是非常有利的，但为什么人们至今都没有发现这些过渡类型呢？我曾努力证明，每个物种的生存更重要的取决于其他的生物类型，而不是气候。因此，真正控制生存的，并不是像温度或湿度那样渐变的条件。我也努力表明，在进一步变异和进化过程中，通常存在的中间类型（其数量少于它们所联结的类型）将被淘汰或灭绝。然而，导致如今大自然中无数中间类型非常罕见的主要原因是自然选择的作用。在自然选择过程中，新变种不断取代并消除它们的亲种类型。但是，既然大量的物种已经灭绝了，按比例就可以推算出，以前在地球上存在的中间变种的数量一定非常巨大。那么，为什么每个地质层和每个地层都没有这种中间类型的存在呢？地质学确实没有证实有如此细微差异的中间类型存在过。这也许是对我的理论最明显和最有利的异议。但是我相信，这一点在于地质记录的极端不完整性。

首先，我们应始终牢记，根据自然选择学说，以前必然存在过哪些中间类型。人们很难避免自己直接对任何两个物种的中间类型进行描绘，其实这是完全错误的。我们应该始终寻找介于两个物种和一个共同但未知的祖先之间的类型；并且，其祖先通常在某些方面与所有后代有所不同。举个简单的例子，孔雀鸽和球胸鸽都是从岩鸽传下来的。如果我们能找到曾经存在过的所有中间变种，就能在这两种鸽子与岩鸽之间建立一个联系非常紧密的系列；但是，孔雀鸽和球胸鸽之间没有任何中间变种，没有一个品种能将这两个品种的特征结合在一起，即不存在既有微微张开的尾部又有略大嗉囊的鸽子。而且，这两个品种已经发生了

很大的变异，以至于如果我们没有关于它们起源的历史或间接证据，就不可能仅通过将它们与岩鸽的构造进行比较，来确定它们究竟是岩鸽的后代还是另一种相似的野鸽的后代。

因此，对于自然物种，如果我们发现差别比较大的生物类型，例如马和貘，就没有理由假设它们之间直接存在中间类型。但是我们可以设想，马和貘与未知的共同祖先之间存在中间类型，共同祖先在整体构造上大致与马和貘有很多相似之处，但在某些构造上，可能与两者有很大的差异，甚至比马和貘之间的差异还要大。因此，在所有这些情况下，即使我们将亲种的构造与其变异后代的构造进行严格比较，应该也无法识别任何两个或多个物种的共同祖先，除非我们发现了几乎完美的中间渐变类型链条。

根据自然选择学说，某种现存生物可能是从另一种现存生物繁衍而来。例如，来源于貘的马；在这种情况下，它们之间将存在直接的中间类型。但是，这种情况意味着一种类型（貘）在很长一段时间内都没有改变，而其子孙却经历了巨大的变化。生物与生物之间、后代与祖代之间的生存竞争原则将使这一情况非常罕见；在所有情况下，新的改良过的生物类型都将倾向于取代旧的未改良的生物类型。

根据自然选择学说，所有现存物种都与本属的祖先联系在一起，其差异不大于我们今天在同一物种的变种之间看到的。这些现在已经灭绝的祖种又与更古老的物种联系在一起。 以此类推，可以追溯至每个大类的共同祖先。因此，所有现存物种和已灭绝物种之间的中间过渡类型的数量一定是令人难以置信的。但是可以肯定的是，如果这个理论是正确的，那么这些中间过渡类型就必然在地球上存在过。

从沉积速率和剥蚀程度来推测时间的进程

除了我们没有发现如此众多的中间类型的化石遗迹外，还有人反对的原因就是，认为没有充足的时间来满足如此大量的生物演变，因为所有变化都是通过自然选择非常缓慢地完成的。我甚至无法引导那些可能不是有实践经验的地质学家的读者，以便使他们了解时间的进程。查尔斯·莱尔爵士的宏伟著作《地质学原理》被后代的历史学家认为是自然科

学领域的一场革命，能够读懂此书却不承认过去的时代极为久远的人，请不要再继续读我的这本书。然而仅仅研读《地质学原理》一书，或阅读由不同的观察者撰写的关于不同地层的专著，并注意每个作者对每个地层的持续时间所做的不完全估计，都远远不够。只有弄清楚了地质作用发生的各种动力，考察了地面被侵蚀多深、堆积多厚的沉积物之后，我们才能深刻认识到过去地质时间的长短。正如莱伊尔所说，某地区沉积层的宽度与深度就是地壳上其他地区被侵蚀的结果和数量。一个人只有多年亲身研究大片重叠的地层，观察小河流如何带走泥土，海浪如何侵蚀掉海岸悬崖等，才有希望领会时间的久远，这些痕迹在我们周围随处可见。

最好沿着由中等坚硬的岩石形成的海岸漫步，并观察侵蚀的过程。在大多数情况下，潮汐只有一天两次短时间到达海岸悬崖，只有在携带着沙子或碎石时，海浪才会侵蚀悬崖。有理由相信，清水对侵蚀岩石几乎没有作用。最后，悬崖的底部被破坏，巨大的岩石掉在海岸边，然后逐渐被侵蚀掉，直到尺寸减小到可以被海浪卷起，然后更快地磨成鹅卵石、沙子或泥土。但是，我们有很多次在后退的悬崖底部看到圆形的巨石，这些巨石全部被海洋生物覆盖，显示出它们很少被海浪卷动，很难被侵蚀。此外，如果我们沿着任何一条后退的海岸悬崖走几千米，就会发现，被侵蚀的海岸悬崖只有很短一段，或在海角周围零星分布着。地表和植被的外观表明，它们已经很久没有被海水冲刷过了。

然而，通过许多优秀的观察家——朱克思、盖基、克罗尔等人以及他们的先驱者拉姆塞的观察，我们可以知道，比海岸边波浪的作用更重要的是地表剥蚀作用（即风化作用）。整个地表都暴露在空气和溶有碳酸的雨水的化学作用下。与此同时，在严寒地区，还要受冰霜的作用。即使在平缓的斜坡上，已经被剥离的物质也会被暴雨冲走。尤其在干旱地区，被风吹走的碎屑的数量多到超乎人们的想象。这些被冲下来的碎屑又被大河小溪带走；湍急的河流加深了河床，碎屑也被打磨得更细。下雨时，即便是在坡度很缓的地方，我们也可以观察到地表被剥蚀的效果——混浊的泥水顺着斜坡流下去了。

拉姆塞和维特克先生曾提起过一个令人印象深刻的发现，即威尔顿地区和横贯英格兰的巨大陡崖线。以前它们曾被视为古代海岸，但其实

它们并不是在海边形成的，因为这两个陡崖都是由同一种地层构成的，而英格兰海边悬崖的每一处都是由各种不同地层交错而成的。如果情况确实如此，我们就不能否认，之所以形成这种陡崖，主要是因为组成它们的岩石比周围地表岩石能更好地抵御风力的剥蚀，于是周围地表被剥蚀会逐渐减轻，遗留下的坚硬岩石就形成了凸起的陡崖线。按照我们的时间观念，风化作用是最有说服力的推证时间久远的例子，因为风化作用的力量极其细微，作用的进程如此缓慢，然而产生了如此惊人的结果。

当我们知道了陆地是在风化作用和海岸作用下慢慢被剥蚀的观点后，想要进一步了解过去时间的久远，最好是一面研究大片区域被移走的岩石，另一面去研究沉积层的厚度。我曾为火山岛的情形而惊叹，此岛被海浪冲蚀，四面被冲蚀掉，成了高达几百米的直立悬崖；因为当初火山喷出的液态熔岩流，凝结成斜度较缓的坡，清楚地表明了坚硬的岩层曾一度向大海延展得那么遥远。断层的变迁将相似的风化剥蚀作用表现得更清晰。顺着那些巨大的裂缝，地层在此处隆起，又在别处下陷，其高度或深度高达数百米；自从地壳断裂以来，不管地面隆起是突然出现的，还是大部分地质学家所认为的那样——由多次震动而逐渐隆起的，并没有太大的差别。现在，地表已经完全平坦，从表面上已经看不到任何曾经巨大的断层错位的痕迹。例如克拉文断层上升有48千米（30英里）；顺着断层面，地层垂直错位从0.18～0.91千米（600～3000英尺）不等。安格尔西的地层下陷达0.70千米（2300英尺），拉姆塞教授曾对此发表过文章。他还告诉我，他坚信美里奥内斯郡的一个断层确实下陷了3.66千米（12000英尺）。但是在这些地方，地表并没留下这种巨大运动的痕迹，断层两边的石堆早已变成平地了。

另一方面，世界各地的沉积层都是非常厚的。我曾在科迪勒拉山对一片砾岩进行过测量，其厚度可达3.05千米（10000英尺）。尽管这些砾岩层的形成速度可能比其他许多沉积层要快，但它们都是由磨损的圆形卵石形成的；每个卵石都意味着耗费了很长的时间，可以很好地说明砾岩的累积速度是多么的缓慢。拉姆齐教授记录了各地区连续地层最大的厚度，在大多数情况下是通过实际测量得出的，结果如下：

古生代地层（火成岩除外） 17.42千米（57154英尺）

中生代地层 4.02千米（13190英尺）

第三纪地层 0.68千米（2240英尺）

共计22.12千米（72584英尺），约合13.75英里。这些地层中，有些在英国是薄层，有些在欧洲大陆却厚达数千英尺。此外，大多数地质学家看来，每个相继的地层之间存在非常长的空白时期。因此，在英国高大的沉积岩堆中，其沉积过程所经过的时间也只代表了地质历史时期的一部分。仔细研究种种事实，会让我们明白，地质历史如此久远，实在难以准确把握，就如我们无法把握“永恒”这个概念一样。

但是，这种想法并没有概括所有的事实。克罗尔先生在一篇文章中说道，“地质时期过长”这个说法并不是错误的，错误的是我们在以“年”为计时单位。如果地质学家研究了这些巨大而繁杂的地质现象，然后再看到几百万年的估算数字，二者会在他的脑海中留下完全不同的印象，立刻觉得这个数字太小了。关于风化剥蚀作用，克罗尔先生通过对比一些河流的流域面积和每年冲刷下来的沉积物的数量，发现需要600万年才能把厚达0.30千米（1000英尺）的坚硬岩石逐渐剥蚀，使其整个面积的平均水平线以上部分被剥蚀掉。这似乎是一个令人惊讶的结果，某些研究令人怀疑这个数字太过巨大了，即使将该数字减到1/2或是1/4，也依然是很惊人的。但是，很少有人知道一百万年的真正含义是什么。克罗尔曾做出了以下说明：假如拿一张25.4米（83英尺4英寸）长的窄纸条，顺着一个大厅的墙壁将其悬挂起来，然后在距离某一端0.25厘米（1/10英寸）的地方做个记号，用这1/10英寸来代表100年，那么整张纸条才代表100万年。要知道，这种计量办法代表的100年在这样一个大厅里没有任何意义，但对于本书所讨论的物种变异而言却至关重要。有一些杰出的育种家，在他们的一生中，大大改变了某些高等动物的特征（而高等动物的繁衍速度远不如大多数低等动物），培育出了新亚种。很少有人能够花费50年以上的时间去认真研究某一个品种，因此100年可以代表两个育种家的连续工作。我们不能假设自然状态下物种可以像家养动物一样，在有计划的选择下改变得那么快。把自然状态下物种的改变与人类无意识选择所产生的效果进行比较，也许更为公正。所谓无意识的选择，是指人类只想保留那些最有用或最好看的动物，却没想过要改变那个动物的品种。然而，即使只是这种无意识的

选择，在两三百年时间里，也大大地改变了许多动物的品种。

但是物种的改变可能要慢得多，在同一地域内，只有少数的物种会一起发生改变。之所以如此缓慢，是因为相同地区内的所有生物，彼此之间早已经很好地适应了。只有经过很长的时间之后，自然条件的变化或是迁入了新类型生物，才能引起生物的改变。此外，当环境改变后，一些生物适应新环境的变异或个体之间的变异往往也不可能马上发生。遗憾的是，我们无法依据年代来确定一个物种的改变究竟需要多长时间。有关时间的问题，我们以后再讨论。

古生物化石标本的贫乏

现在让我们看看收藏最丰富的地质博物馆的情况，即使是这样，人们所见到的陈列品也少得可怜!每个人都承认目前搜集的化石标本非常不完善。我们永远也不会忘记令人敬佩的古生物学家爱德华·福布斯的一句话，即化石都是以某个地点搜集的少数几个标本命名的，甚至有些是单个且经常是破碎的。欧洲每年都有重要的化石被发现，这就证明我们仅对地球表面的一小部分进行了地质勘探，并且没有任何地方的采掘是充分的。没有骨、壳构造的软体生物无法保留下来。有贝壳和骨头的生物落在没有沉积物堆积的海底时，它们也会腐烂消失。我们可能一直在相信一种错误的观点，即沉积物以足够快的速度在几乎整个海床上埋藏和保存了大量生物遗骸。在整个海洋中，海水的亮蓝色代表着其纯净。有文献记载，某个地层在经过很长时间的间隔后会被另一个晚期的地层所覆盖，而下面的一层在此间隔期内没有遭受任何磨损，似乎仅从海底保持不变的角度可以解释得通。如果生物和遗体埋入沙子或砾石中，在底层上升之后，通常会因含有碳酸的雨水的渗入而溶解。在高潮线和低潮线之间的海滩上生存的许多动物，其中只有极少数被保留下来。例如，藤壶亚科（无柄蔓足类的一个亚科）的几种物种，覆盖在全世界各地的岩石上，它们数目众多，是典型的海滨生物。除了在西西里岛发现的一个生活在地中海深水中的化石外，迄今尚未在任何第三纪底层发现其他任何藤壶亚科物种；然而，现在我们已经知道，藤壶属曾存在于白垩纪时期。最后，还有许多需要很长时间堆积而成的非常深厚的沉积层，里面都没有发现生物的遗骸，目前我们还无法解释其缘由。其中一个最典

型的例子是复理石地层，它由页岩和砂岩组成，厚度达数千英尺，有的地方甚至达1828.8米（6000英尺），从维也纳到瑞士绵延300多英里（注：1英里≈1.6千米）。然而，在经过仔细的考察后，这种特厚的岩层中除了极少数植物遗骸外，并未发现任何别的化石。

关于在中生代和古生代时期生活的陆栖生物，我们得到的化石遗骸证据非常有限。直到最近，莱伊尔和道森博士才在北美洲石炭纪地层中发现了一种陆相贝壳化石，除此之外，尚未发现其他陆相贝壳（不过，在下侏罗纪地层中已发现了新的陆相贝壳化石）。关于哺乳类遗骸，只需看一下莱尔的《手册》中公布的历史年表，就会发现事实真相，即被保留下来的哺乳动物化石是多么偶然和稀有。然而，这也并不令人惊讶，因为第三纪哺乳动物的骨骸大多是在洞穴或湖床沉积物中发现的，而中生代和古生代中，并没有洞穴或真正的湖床沉积地层。

但是，地质记录的不完整性确实主要不是由上述原因造成的，更重要的原因是多个地层之间有很长的间断。许多地质学家和古生物学家（包括和福布斯先生一样完全不相信物种会变化的学者） 都认同这种看法。当我们看到书面作品中列出的地层图表时，或者我们在野外考察时，都很难不去相信各个地层是紧密相连的。但是，从默奇森爵士关于俄罗斯的伟大著作中，我们知道该国在重叠的地层之间存在着巨大的间断，在北美以及世界其他许多地区也是如此。如果经验最丰富的地质学家的注意力仅限于这些范围较大的地区，就永远不会想到，在他家乡地层处于沉积间断的“空白”时期，其他地方已经堆积了如山的沉积物，其中充满了新奇和独特的生物类型。而且，如果无法确定地在某个单独区域连续地层之间建立时间序列，那么在其他地方也无法确定这一点。连续地层的矿物成分常常会发生频繁而巨大的变化，这通常意味着周围地区地理上的巨大变迁，因为沉积物是从周围地区汇集来的，这一事实与各个连续地层之间曾有长期沉积间断的观点是一致的。

我认为，我们可以理解为什么每个区域的地层沉积几乎总是断断续续的，也就是说，彼此之间并没有紧密连续。沿着南美海岸数百千米的海岸考察时，让我最震惊的是，海岸在短期内上升了数百英尺（注：1英尺≈0.3米），几乎没有任何近代的沉积物。整个西海岸都栖息着特殊的海洋动物，然而那里的第三纪层如此不发达，以至于一些连续而独特

的海洋动物的化石不能保留下来。我们稍加思考就能明白，尽管多年来，有大量崩落的海岸岩石以及河流入海带去的泥土，即有长期充足的沉积物供应，但是为什么顺着南美西部上升的海岸无法找到具有近代或第三纪遗骸的特大地质层？毫无疑问，这是因为沿海波浪的冲蚀作用使土地在缓慢而逐渐地上升时，海岸和近岸的沉积物也不断地被侵蚀掉。

可以确定，沉积物必须极厚、极坚固或极大地堆积，才能在第一次上升时以及在随后的水平面上下波动期间承受波浪的侵蚀作用。这种厚而广的沉积物堆积可以通过两种方式形成：要么形成在深海中，海底只有极少物种生存，而在这种情况下，当海底上升时，它所包含的生物化石记录相对于地层堆积期间生存在它周围的生物而言就极不完整；要么形成在浅海中，如果沉积物继续缓慢沉降，则其可能会在浅海底部形成巨大的堆积。在后一种情况下，只要沉降速度和沉积物的供应速度平衡，海洋就会保持浅水状态，并有利于不同类型生物遗迹的保存。如此一来，富含化石的地层的厚度就会增加，当它上升变为陆地后，就足以抵御强烈的侵蚀作用。

我坚信，所有化石丰富的古代底层都是在海底沉降过程中形成的。我自1845年发表了关于这一问题的观点，一直关注着地质学的进展，并惊讶地注意到，许多专家在讨论各个巨大的地层时，都得出了相同的结论，即认为它是在海底沉降过程中积累形成的。我还要补充的是，南美洲西海岸唯一的古代第三纪地层，在海底下沉时积累了可观的厚度，其厚度足以抵御岩石的崩塌作用。不过，这个地层几乎很难持续到未来更遥远的地质时代。

所有地质事实都清楚地告诉我们，每个区域都经历了缓慢的水平振荡，而且这些振荡显然产生了广泛的影响。因此，在沉陷期间，可能已经在广阔的空间中形成了化石丰富、足够厚且能够抵御随后的侵蚀的地层。只有当沉积物的供应足以使海面保持足够的浅度，并且残骸腐烂之前就被埋藏和保存，这些地层才能形成。另一方面，如果海床保持静止，那么沉积物就不会在最有利于生物保存的浅层部分积聚得很厚。在交替的上升期间，沉积会更少；更准确地说，即使已经积累起来的地层，在上升并进入海岸作用的范围后，也常常被破坏了。

上述分析主要是针对海岸和近海岸的沉积而言。在广阔的浅海情况下，例如马来群岛的大部分，海水深度在0.76～1.52米（30～60英寸）之间，当海底上升时，就可以形成大范围的地层。同时，由于海底缓缓上升，所受到的侵蚀也不至于过大。不过这种地层可能不会很厚，因为地层的上升运动，使得地层的厚度要比它所形成地方的海水深度小。而且，上升运动也使地层沉积物堆积得不太坚固；它的层面上也不会有其他地层覆盖，这样在以后海底上下颤动时，就很容易遭受风化剥蚀和海水的冲蚀。然而，根据霍普金斯先生的意见，如果某一区域在上升后尚未遭受剥蚀就已下沉，那么即便它在上升时所形成的沉积层不厚，也能够得到此后新沉积物的保护而长期保留下来。

霍普金斯先生还认为，面积广阔的沉积层不太可能被全部破坏掉。大部分地质学家都认为岩浆岩外层已经被剥蚀掉了，只有少数地质学家相信现在的深成岩浆岩和变质岩曾是构成地球核心的物质。这类岩石在没有地层覆盖的情况下很难凝固结晶，但是如果在深海底发生了变质作用，岩石原来的保护性地层就不会很厚。如果认为片麻岩、云母片岩、花岗岩、闪长岩等曾经被掩埋过，那么对于地球上不少地方这类岩石大面积裸露出来的现象，我们只能解释为原有的覆盖层已经完全被剥蚀了。毋庸置疑，这类岩石是大面积存在的：根据洪堡的描述，巴赖姆地区的花岗岩范围至少是瑞士面积的19倍。在亚马孙河南面，布埃曾划出一片花岗岩区域，其面积相当于西班牙、法国、意大利、德国的一部分及英国各岛的总面积。这块地方还没有被详细地考察过，但是根据旅行家提出的所有证据，可以证明这片花岗岩面积是很大的：例如冯·埃什维格曾绘制了花岗岩地区的详细地图，其范围自里约热内卢延伸至内地，直线距离达260海里；我又沿着另一方向走了150海里，沿途见到的都是花岗岩，整个海岸从里约热内卢开始，到拉普拉塔河口为止，全长1100海里。我沿途采集了大量标本，经研究发现，它们都是花岗岩类。沿着整个拉普拉塔河北岸的全部大陆，我发现除了近第三纪地层外，只有一小片是轻变质岩，这也许是最初覆盖这片花岗岩区唯一剩下的部分。下面说说我们比较熟悉的地区，例如美国和加拿大，我曾按照罗杰斯教授精美的地图剪出了图纸，并且使用称重的方法来估算各类岩石的面积，发现变质岩（半变质岩除外）和花岗岩的比例为19:12.5，两者面积之和比全部晚古生代地层的面积还要大。在很多地区，如果把覆盖在变质岩

和花岗岩上面的所有沉积岩层移去的话，就会发现它的实际含量要比我们看到的大得多，而沉积岩层也不可能产生结晶花岗岩的原始覆盖物。因此，在地球上的某些区域，其沉积地层可能已经全部被剥蚀掉了，没有留下任何痕迹。

还有一点需要注意。在上升期间，陆地和邻近浅滩部分的面积将增加，并且经常会形成适合生物生存的新场所；如前所述，新场所中的所有情况都有利于形成新变种和新物种，但在此期间，地质记录通常会是一片空白。另一方面，在沉降过程中，生物的栖息地面积和数量将会减少（大陆沿岸最早分裂成的群岛除外）。因此，在沉降过程中，尽管很多生物灭绝了，但也会形成新变种或新物种；在沉降过程中，富含化石沉积物就积累起来了。

任何一个地层中都缺失许多中间变种

根据上述种种情况考虑，地质记录是非常不完善的。但是，如果我们将注意力集中在任何一个地层上，就很难理解为什么我们没有在其中找到近缘物种之间的中间变种。有记录表明，在某些情况下，同一物种在同一地层的上部和下部出现了不同的变种。例如，特劳希勒曾列举的菊石；黑尔干道夫曾在瑞士连续沉积的淡水地层内发现，多形扁卷螺存在十种递变类型。尽管每个地层的沉积肯定需要相当长的时间，但是为什么每个地层中都没有一直生存在那里的物种之间的递变连锁系列呢？对此，我们可以列举出几个理由。不过，我对下面所讲的理由还不能给予恰当的评价。

尽管每个地层的形成都需要花费很长的时间，但与一个物种演变为另一个物种所需的时间相比，还是太短了。布隆和伍德沃德这两位古生物学家的意见值得我们认真听取并考虑。他们曾认为，每个地层的平均存在时间是特定物种的平均存在时间的两倍或三倍。但是，在我看来，无法克服的困难使我们无法做出任何公正的评价。当我们看到某个物种首先出现在任何地层中时，就推断它不曾在其他更早的地层存在过，这无疑是轻率的。因此，当我们再次发现某个物种在一个沉积层尚未结束之前就消失了时，就假设它已经完全灭绝，这同样是轻率的。我们应该记住的是，欧洲与世界其他地区相比有多小；在整个欧洲，同一地层的

几个阶段也并非是有关联的。

对于各种各样的海洋动物，我们可以谨慎地推断出，在气候变化和其他因素变化期间曾大量迁移；当我们看到某个物种在任何地层初次出现时，该物种很可能才刚刚移民到该地区。众所周知，在北美的古生代地层中，有几个物种出现的时间要早于欧洲，这是因为从北美洲向欧洲迁移需要相当长的时间。在考察世界各地的现代沉积物时，到处都可以看到，该沉积物中尚有一些现在仍很常见的物种，但在紧邻的海域却已经灭绝；相反，一些海洋生物现在在邻近海域很繁盛，但在沉积岩中却很少或没有。探查在冰川时期欧洲生物实际的迁移量（冰川时期只是整个地质时期的一部分）、海陆的升降变迁、气候的巨大变化、悠久的时间历程，这是有好处的。然而，可能无法确定的是，在这段时间里，包含化石遗迹的沉积层是否一直在该地区沉积。例如，在整个冰河时期，密西西比河河口附近海水正好适合海相动物的繁殖，但是那里的沉积物不可能完全是在冰河时期连续堆积起来的。因为我们知道在这段时间，美洲的其他地区发生了巨大的地理变迁。如果在冰河时期的某个时期，沉积的这些地层在密西西比河河口附近的浅水中上升时，由于物种的迁移和地理的变迁，生物遗骸可能会出现或者消失在不同的地层中。在遥远的将来，地质学家研究这些地层可能会得出结论：埋藏化石的平均生存期比冰河时期要短；然而事实却是比冰河时期更长，因为这些生物是从冰河时期前一直延续到今天的。

为了在同一地层的上部和下部两种形式之间获得全部渐变类型，该地层必须长时间地不断堆积，以便为缓慢的变异过程留出足够的时间。因此，该沉积层通常必定是极厚的，并且正在经历变异的物种也必须在这段时间内都栖息在该地区。但是我们已经看到，厚厚的富含化石的地层只能在下层期间堆积；为了使相同物种能够持续生活在相同地点，就必须保持海水深度大致相同，因此沉积物的供给必须与沉降量保持平衡。但是，这种沉降运动往往会使沉积物的来源地区也浸泡在水中，从而在连续向下沉降时期减少沉积物的供给。实际上，沉积物供应量与沉降量之间的这种几乎精确的平衡可能是一种罕见的偶然情况。许多古生物学家已经观察到，除了顶部和底部之外，其他非常厚的沉积层通常都没有生物的遗骸。

就像任何地区的整套地层，似乎每个单独的地层也是有间断的。当我们经常看到各个层次由不同矿物组成的地层时，可以合理地怀疑沉积过程是间断的。即使对地层最详尽的考察，也无法确定其沉积消耗的时间。有许多实例可以证明，有的岩层厚度只有几英尺（注：1英尺≈0.3米），却代表了其他地方厚达几千英尺的地层，而且它们的堆积必定耗费了很长时间。但是，一个不知道这一事实的人，会怀疑以这样稀薄的地层如何能代表长久的时间过程。在许多情况下，一个地层升起后，其底部被剥蚀，再下沉，然后再被同一地层的上层重新覆盖。这些事实表明，地层的堆积过程中存在着容易被忽略的间隔。在其他情况下，我们发现了显著的证据：大型树木的化石像活着的时候一样，仍保持直立状态，这表明在沉积过程中具有漫长的间隔，并发生了水平面的升降变化，如果没有发现这些树木化石，就永远不会有人想到这些。例如，莱尔和道森先生在新苏格兰发现了427米（1400英尺）厚的石炭纪地层，其中至少有68个含有古老树根的不同层面彼此相叠。因此，当同一物种的化石同时出现在地层的底部、中部和顶部时，很可能说明这一物种在整个沉积过程中经历了多次绝迹和多次重现。因此，如果这些物种在任何一个地质时期发生了显著的变异，那么这个地层中就不可能找到中间递变类型。然而，那些突然变异的形体必然会保留下来，尽管那些变异可能非常微小。

要记住，博物学家并没有区分物种和变种的黄金法则。他们承认每个物种之间都有细微的差异，但是当发现任何两种差异较大的类型时，除非能够通过紧密的中间渐变类型将它们联结在一起，否则两种类型都将被列为物种。出于上述原因，我们很少希望在任何一个地层的断面中发现中间渐变类型。假设B和C为两个物种，第三个物种A位于下面的岩层中；即使A确实介于B和C之间，除非有中间类型将A和B、C紧密地联系在一起，否则A将仅被列为第三个不同的物种。如前所述，也不应忘记A可能是B和C的真正原始祖先，所以不一定在所有性状上都严格地介于它们之间。这样，我们就可以从一套地层的上下层获得亲种及其变异后代，除非我们能找到中间类型，否则无法辨认它们之间的关系，因此会被迫将它们列为不同的物种。

众所周知，许多古生物学家在确定物种时，只是依据它们之间存在

的微小差异。如果标本来自同一地层的不同层位，他们就会更轻易地下结论。现在，一些经验丰富的贝类学家正在将多比内和其他学者划分过的物种降级为变种；而且根据这种观点，我们确实看到了物种演变的理论证据。再来看看第三纪后期的沉积层，很多博物学家都认为其中包含的许多贝类和现存物种是相同的；但是某些杰出的博物学家，例如阿加西斯和皮克特却认为，尽管差别很小，但是所有第三纪物种和现存物种都是不同的物种。在这种情况下，如果我们认为阿加西斯和皮克特的判断是正确的，也就是说，反对大多数博物学家的观点，承认这些第三纪的物种确实不同于现代物种，这样就可以获得我们所需要的物种的细微变异会频繁发生的证据了。此外，如果我们研究一下较长的间隔，即同一地层的不同层位，就会发现，虽然埋藏的化石几乎普遍被列为不同物种，但如果与相隔更远地层中的物种相比较，同一地层物种彼此之间的联系要紧密得多。因此，我们再次找到了渐进演化理论所需要的物种演变的确凿证据；关于这一主题，我将在下一章中继续讨论。

对于可以快速繁殖并且迁移很少的动植物，正如我们以前所看到的，有理由合理怀疑它们的变种通常最初是在局部地区形成的，并且这些地方变种在相当程度上经过变异和完善之后，才会广泛传播并取代其亲种。根据这种观点，在任何一个地区的地层中发现任何两个物种之间所有早期过渡类型的机会很小，因为连续变异常常局限于某个地区。大多数海相动物的分布区域都很广泛，我们已经看到，对于植物而言，分布范围最广的物种最容易发生变异。因此，对于贝壳和其他海相动物来说，可能是范围最广的、远远超出了欧洲已知地层范围的最容易产生变种，首先是地方性变种，然后形成新物种。这将大大减少我们能够在任何一地层寻找过渡阶段演变痕迹的机会。

最近，福尔克纳博士通过一项更为重要的研究得出了这样的结论，即每个物种发生变异的时间，如果以年代计算是很久远的；然而与它们没有发生变化的时期相比较，又显得很短暂。

我们应该牢记，在有完善的标本进行研究的情况下，也很少有两个类型可以通过中间变种联系起来，因此想要证明它们来源于同一物种，就需要从许多地方采集许多标本才行；然而，化石物种的采集很少能做到这一点。也许通过问自己某些问题，我们才能认识到，不可能通过中

间类型的化石将两个物种联系起来，例如，将来某个时代的地质学家能不能证明，牛、羊、马和狗的若干变种是从一个原始物种还是若干原始物种传衍而来的呢？又比如，生存在北美海滨的某些贝壳是变种还是某些不同的物种？它们被某些贝类学家视为物种，但是却被其他贝壳学家视为变种。想要回答这些问题，未来的地质学家需要在化石中发现更多的中间类型，然而他们成功的机会很渺茫。

相信物种不会演变的学者，不断地强调地质学中无法找到中间过渡类型，我们将在下一章证明这种论调是错误的。正如卢伯克爵士所说：“任何物种都是其他近缘类型的中间环节类型。”如果一个属包含20个物种（现存的和灭绝的），其中有4/5的物种灭绝了，那么剩下的物种之间的差异将会更明显。如果这个属的两个极端类型灭绝了，那么这个属与其他近缘属的差异也会变大。地质研究尚未发现的是：以前存在过的无数中间渐变类型，它们如同现存变种一样有细微的变异，可以联结所有现存物种和灭绝物种。在所有反对我的观点的意见中，这可能是最严重最有力的一点，尽管不可能实现。

我们借助一个假想的例子，来总结前面关于地质记录不完整的各种原因。马来群岛的面积与欧洲差不多，即从北角到地中海、从英国到俄罗斯的范围。除美国的地层外，马来群岛的面积差不多等于所有精确调查过的地层面积的总和。我完全同意戈德温·奥斯丁先生的观点，即马来群岛众多的大岛屿被广阔的浅海隔开，很可能和远古时的欧洲的情况类似。马来群岛是全世界生物最丰富的地区之一，但是如果想要搜集在这里生活过的所有物种以代表自然历史，就会发现它们是多么的不完整！

我们有充分的理由相信，马来群岛的陆相生物保存得很不完全。我怀疑，没有很多真正的海滨动物或那些生活在裸露的海底岩石上的动物会被掩埋，而那些掩埋在砾石或沙子中的生物也无法长久地保存。如果沉积物没有在海床上堆积，或者没有以足够的速率积聚以保护生物不致腐烂，就无法保存任何生物遗骸。

类似过去中生代的地层，马来群岛那些足够厚的富含生物化石的地层，只能形成于地面下沉时期。这些下沉时期之间存在很长的间隔，在间隔期间，该区域将是静止的或上升的。在上升时期，沉积层在整个马

来群岛的浅海中堆积得非常厚，后来的沉积物很难将其覆盖。在下沉时期，很多生物可能会灭绝。在上升期间，很多生物会发生很大的变异，但是这个时期的地质记录却是最不完整的。

整个群岛或某个部分的下沉时间（同时也是沉积物堆积时间）是否会超过一个物种的平均生存时间，我们不得而知。可是，这两个时间在持续时间上的情况，对于保留物种之间的中间类型是必不可少的。如果不能完全保留这些中间类型，那么过渡变种将仅仅被当作近缘新物种。同样，每个漫长沉降的时期都很可能会被水平面的振荡打断，气候也会在这样长的时期内发生轻微的变化。在这种情况下，群岛上的生物将不得不迁徙，因此生物变异的详细记录都无法保存在任何地层中。

现在，该群岛许多海相生物的活动范围已经超出了群岛的范围，并且分散到几千千米以外。以此类推，我们相信这些分布范围广泛的物种最常产生新变种。这些变种最初通常是地方性的或局限于一个地方，但是如果它们拥有了任何决定性的优势，或者经过进一步的变异和改良后，将慢慢扩散并取代其亲种。当这些变种回到原产地时，它们与祖先物种的性状已经不同了，尽管差异可能很小，但由于它们和祖先物种是在同一地层的不同亚层被发现的，因此根据许多古生物学家遵循的原则，它们将被列为新的不同物种。

如果上述内容有一定程度的真实性，那么我们就无法在地层中发现差异很小的过渡类型。根据自然选择学说，这些过渡类型联结了过去和现在的所有物种，同一群体会成为一条生命链。我们希望找到一些生命链，也确实找到了，链条中物种之间的关系有的很紧密，有些则比较疏远。这些链条中的物种，虽然关系密切，但如果在同一地层的不同层位被发现，大多数古生物学家仍会将它们列为不同的物种。但是我想说，如果不是每个地层初期和末期保留下来的生物化石缺少中间类型，我的学说也不会受到严重的威胁，但我不会怀疑保存得最好的地质剖面中，化石记录还是十分贫乏。

整群相关物种的突然出现

阿加西兹、皮克泰和塞奇威克教授这几位古生物学家，反复强调某

些地层中突然出现整群物种的事实，以致命的方式反对物种演化学说。如果属于同一属或科的众多物种真的是在某一时刻同时突然出现的，那么这一事实对于通过自然选择进行缓慢变异的进化论将是致命的。按照自然选择学说，所有同类生物都是从一个共同祖先传衍下来的，这一定是一个极其缓慢的过程，而且这个共同祖先必须在变异后代出现之前已经存在了很长一段时期。但是，我们不断高估地质记录的完善性，并错误地推断出它们在该阶段之前不存在。在所有情况下，肯定性的古生物证据是绝对可靠的，而否定性的证据则是没有价值的。我们常常忘记，与我们认真研究的地层相比，世界有多大；我们也忘记了，在其他物种入侵古代欧洲和美国的群岛之前，它们可能在其他地方早已存在并缓慢繁殖着。我们没有考虑到，在某些情况下，连续的地层之间可能有巨大间断时期，这可能要比每个地层沉积所需的时间更长。这么长的时间间隔足以使亲种繁衍出许多子种，而在随后形成的地层中，这些物种成群出现，似乎是被突然创造出来的一样。

在这里，我们回顾一下之前的内容，即可能需要很漫长的时期，才能使一种生物适应某种新的、特别的生活方式，例如在空中飞翔。这样一来，生物的中间过渡类型就会在某一区域内留存很久。但是，一旦成功适应，并且少数物种因此获得了超越其他生物的巨大优势，就只需要相对较短的时间来产生许多不同的变异类型，并在世界范围内迅速而广泛地传播。皮克泰教授评价本书时指出，他无法看出假设的原始型鸟的前肢持续的变异对鸟有什么好处。我们可以观察一下南极的企鹅，它们的前肢不正是介于“既不是真正的手臂，也不是真正的翅膀”的中间状态吗？然而这种鸟在生存斗争中成功地占领了自己的地盘，繁衍了无数的个体，并且其种类也相当多。虽然我不敢断定在企鹅的身上看到了鸟翅演变所经历的真正的中间过渡阶段，但是我相信，翅膀的演变可能确实有利于企鹅的变异后代，让它们先变得像呆鸭一样能沿着海面拍打翅膀，并且最终能够在空中滑翔。

我现在举几个例子来证明上述论点，同时也说明整个物种群突然出现的观点会导致我们犯下巨大的错误。皮克泰有关古生物的巨著，从第一版（1844—1846）到第二版（1852—1857）的短短几年间，便大幅度地更改了几个动物种群出现时间和消失时间的结论，而在第三版里可

能还会出现更多的修改。我再说一个广为人知的事实，即在几年前发表的地质论文中，普遍认为哺乳动物的大类是在第三纪的早期突然出现的。现在，已知含有哺乳动物化石最丰富的沉积物之一属于中生代中期。在接近中生代早期的新红砂岩中发现了真正的哺乳动物化石。居维叶曾经强调，第三纪地层中没有猴子化石。但是现在，已经在印度、南美和欧洲都发现了已经灭绝的猴类物种。如果不是在美国的新红砂岩中发现偶然被保留下来的足印化石，没有人会想到，那个时代至少存在30种似鸟的动物。不过在这些岩层中，还没有发现似鸟动物的遗骸。前不久，有些古生物学家认为整个鸟纲都是在始新世突然出现的。但是现在，按照欧文教授的权威观点，我们知道在上绿砂岩层沉积时期已经存在一种鸟类了。最近，人们又在索伦霍芬的鲕状灰岩里发现了一种奇怪的鸟，名叫始祖鸟，长着像蜥蜴一样的长尾，尾部的每一节都有一对羽毛，羽毛上长着两个可以活动的爪子。始祖鸟的发现更有力地证明了，我们对地球上的古老生物的了解实在太少了。

我还要再举一个亲眼所见的例子。我曾在关于无柄蔓足类化石的作品中说过，从现有和灭绝的第三纪物种的数量来看，从北极地区到赤道，全世界许多物种的个体数量异常丰富。标本保存状态最完整的是在第三纪的地层中，由于标本（甚至是一个破碎的瓣壳）很容易识别，从所有这些情况来看，我推断，如果在中生代存在无柄蔓足类动物，它们肯定会被保存和发现；由于在这个世代的岩层中没有发现任何无柄蔓足类物种，于是我推测这一大类是在第三纪初期突然形成的。这给我带来了极大的麻烦，因为又出现了一大类物种突然出现的情况。但是就在我的作品即将发表时，著名的古生物学家波斯开给我寄了一张完整的无柄蔓足类动物化石标本的图片，这个化石是他从比利时的白垩纪地层中采集到的。这张图片给我带来了很大的影响。这种无柄蔓足类是非常常见的，属于庞大且无处不在的藤壶属，以前在任何第三纪的地层中都没有发现过这种化石。最近，伍德沃德先生又在上白垩纪地层中发现了无柄蔓足类的亚科四甲藤壶。因此，我们现在可以肯定地知道，无柄蔓足类曾在中生代存在过。

古生物学家最常提起的整群物种明显突然出现的例子是硬骨鱼类。按照阿加西斯的说法，它们最早出现在白垩纪时期。硬骨鱼类包括绝大

多数现有鱼类物种。但是，有些侏罗纪和三叠纪的类型，如今一般也被认为是硬骨鱼类，甚至还有些古生代的类型也被一位权威古生物学家列入此类。但是，如果硬骨鱼类真的是在北半球的白垩纪初期就突然出现了，这一事实无疑是非常值得关注的。但是，我并不认为这是一个难以解决的问题，除非有人可以证明，在白垩纪初期，这一群体的物种也在世界其他地区同时突然出现了。目前还没有在赤道以南地区发现任何鱼类化石，对此没必要再说了。通过阅读皮克特的古生物学发现，在欧洲的好几套地层中发现了很少几种硬骨鱼化石。现在，少数一些鱼类物种的分布范围有限。硬骨鱼类以前可能具有类似的范围限制，直到它们在某个海域中大量繁衍之后，才广泛传播到各个海域。我们也没有权利假设，世界海洋一直像现在这样，从南到北都是自由连通的。即使在今天，如果将马来群岛转变为陆地，印度洋的热带地区也将形成一个大而完美的封闭海盆，任何大群的海相生物都可以在这里繁衍。在这里，它们将一直处于封闭状态，直到某些物种适应了凉爽的气候，就能绕过非洲或澳大利亚的南部海角，到达其他更远的海洋。

考虑到这些事实、我们对欧洲和美国以外其他地区的地质情况的不了解，再加上最近十多年来古生物学观念的更新，在全世界范围内对生物的继承问题武断地下定论是很轻率的。这就好像让博物学家在澳大利亚某个荒原待上几分钟，就讨论当地的生物数量和分布范围一样。

整群物种在已知最古老的含化石地层中突然出现

还有一个更加棘手的问题。我指的是，动物的几个物种突然出现在已知最古老的富含化石的岩层中的情况。前面的大多数论述使我相信，同一类群的现存物种都起源于一个原始祖先，这一观点同样也适用于描述已知的最早物种。例如，寒武纪的三叶虫类都起源于某种甲壳类动物，这些甲壳类动物必然早在寒武纪之前就已经存在了，而且可能与任何已知动物有很大的不同。鹦鹉螺、海豆芽等一些最古老的动物，与现存物种没有太大区别；从我的学说来看，不能认为这些古老物种是它们所属同类物种的祖先，因为它们没有表现出任何中间性状特征。

如果我的学说是正确的，那么毫无疑问的是，在寒武纪的底层沉积之前有一个很漫长的时期，这个时期可能和从寒武纪到现在一样长，甚

至可能更长。在这段漫长的时期内，各种生物已经遍布于全世界。这里，我们又遇到一个难题，地球在适合生物居住的状态下是否已经经过了足够长的时间？汤普森爵士推断，地壳凝固时间不会低于两千万年，也不会超过四亿年，可能是在九千八百万年到二亿年之间。这么大的时间范围，说明这些数据是相当可疑的，况且还涉及其他因素。克罗尔先生估计，从寒武纪到现在大约有六千万年。然而，自从冰河时期开始以后，生物的变化就很小，这与从寒武纪以来生物发生的多次巨大变化相比，六千万年好像太短了；而寒武纪之前的一亿四千万年，对许多生存在寒武纪时期的生物的早期演化而言，也是不够的。如汤普森爵士所说，在遥远的远古时期，自然环境的变化或许比现在更加迅速而猛烈，因此这种自然变化会促使当时存在的生物以相对应的速度发生变异。

关于为什么我们找不到这些寒武纪以前时期的化石记录的问题，我无法给出令人满意的答案。莫企逊爵士等著名地质学家都深信，我们在寒武纪底层的生物遗迹中看到了地球上生命的开端。莱尔和福布斯对此结论提出了异议。我们不应忘记，世界上只有一小部分地区被精确探查过。巴兰得最近在寒武纪地层中又发现了一个靠下的地层，里面到处是奇特的物种。希克斯先生则在南威尔士下寒武地层下面发现了三叶虫、软体动物和环节动物等生命痕迹。在最下面不含生物的岩层中，也有磷酸盐结核和沥青物质，这表明可能在那时已经有生命存在了。众所周知，在加拿大的劳伦纪地层曾存在过始生虫。加拿大寒武纪下面有三大系列地层，在最下面的地层中曾发现过始生虫。洛根爵士说过："这三大系列地层的厚度总和，可能远远超过了从古生代底部到现在的岩石的厚度之和。这样一来，即使是巴兰得所谓的原生动物出现的遥远时期，也就是古生代初始时期，原生动物的出现就好像最近发生的事情似的。"始生虫在所有动物纲中是最低等的，但在原生动物分类里又是高级的；它曾大量存在过，正如道森博士所说，这种动物主要捕食其他微小生物，因此这些微小生物也必然大量存在过。因此，我在1859年提出了关于生物出现在寒武纪以前的推断，这和后来洛根爵士的描述几乎是一样的，现在已经被证实了。但是，我们很难理解为什么在寒武纪之前没有富含化石的巨大地层。如果这些最古老的岩层由于剥蚀作用被全部磨损掉了，或者由于变质作用而被全部破坏了，似乎是不可能的。假如这样的话，我们应该在其后继的地层中发现少量细小的化石残余。但是，根据

对俄罗斯和北美广大领土上寒武纪地层的记录，“地层越古老，其遭受剥蚀和变质作用的可能性就越大”的观点并不正确。

目前还无法解释这样的情况，所以被作为反对我的学说的有效论据。为了说明这个问题此后可能会得到一些解释，我将给出以下假设。从欧洲和美国的一些地层里生物遗骸的性状来看，这些似乎不是深海动物；从构成地层的沉积物的数量（厚达数千米），我们可以推断出，在沉积期间，那些供应沉积物的大岛或大陆一直处于现在欧洲和美洲大陆附近。但是，我们不知道在连续地层之间的间隔情况是怎么样的。在这段时间内，欧洲和美国是作为陆地，还是作为没有沉积物的近陆海底，又或者是作为广阔而深不可测的深海底，皆不得而知。

现在海洋的面积是陆地的三倍，其中散布着许多岛屿。但是，除了新西兰外，迄今还没有一个海岛能够提供任何古生代或中生代地层的残片。因此我们推测，在古生代和中生代时期，我们现在的大洋范围内，大陆和大的岛屿都不存在。因为如果存在大陆和大的岛屿，那么其剥蚀、崩裂产生的沉积物一定会积累并形成古生代和中生代地层；部分地层会因为水平面的波动而隆起。如果那样的话，我们推断，现在是海洋的地方在远古时代就已经是海洋了；现在是大陆的地方，从远古时代开始就已经是大陆了，而且从寒武纪以来遭受了海平面的巨大影响。在我的一本关于珊瑚礁的书中，我根据里面的彩色地图得出结论：大洋仍然主要是下沉区域，各大群岛仍然是水平面振荡区域，而大陆仍然是上升区域。但是，我们不能认为世界从一开始就是这样的。我们的大陆似乎是由多次水平面波动引起的上升力量形成的；但是随着时间的流逝，主要的运动区域是否会发生变化？在寒武纪之前的遥远时期，大陆可能存在于现在海洋的位置，而如今我们大陆所处的位置可能是广阔的海洋。

我们没有理由假设，如果现在太平洋海底变成陆地，我们就可以在那里找到比寒武纪更古老的沉积层。因为这个地层可能下沉到靠近地心的地方，并且受到大量海水的巨大压力，该地层的变质作用可能要比接近地表的地层大得多。在世界某些地区，例如南美，巨大的裸露变质岩层必然经历过高温高压，在我看来，这种地区需要特殊的解释。我们也许可以相信，在这些大区域中，我们能够发现寒武纪以前的地层经历了完全变质及侵蚀后的情况。

本章讨论的难点是：第一，我们在地层中发现现存或曾经存在的许多物种之间的中间类型，但是没有发现能把它们联系起来的过渡类型；第二，整个物种群突然出现在欧洲地层中；第三，目前已知，寒武纪地层以下几乎没有富含化石的地层。所有这些难点的重要性显而易见。所有最著名的古生物学家（即居维叶、欧文、阿加西兹、巴兰得·法尔科纳、福布斯等人），以及所有最伟大的地质学家（如莱尔、默奇森、塞奇威克等人），都曾一致支持物种不变的观点。但是查尔斯·莱尔爵士以权威的身份转而支持相反的观点，这也极大地动摇了大部分地质学家与古生物学家坚持原先观点的信念。那些认为地质记录在任何程度上都是完整的人，无疑会立即反对我的学说。就我自己而言，按照莱尔的隐喻，我将地质记录视为不完整的且以变化的方言书写的世界历史。在这段历史中，我们仅拥有最后一卷，仅涉及两到三个国家。在最后一卷中，有一些零碎的章节保留了下来，每一页都只有寥寥几行文字。这不断变化的每个方言单词在各章的意义或多或少地有所不同，它们可能代表着在连续地层里被误认为是突然出现的生物类型。根据这种观点，以上难点便会变得简单，甚至消失。

第十一章：古生物的演替

我们现在来分析几种生物在地质上演替的事实和法则，以此判断“物种不变”的观点和“物种经过变异与自然选择而不断缓慢演替”的观点，究竟哪一个是正确的。

新物种一个接着一个地出现，不论在陆地还是在水里，这种发展状况都是很缓慢的。莱伊尔曾经提到过，这样的事实曾出现在第三纪的某些时期，是确实存在且不可辩驳的；每年都有新物种被发现，填补了各个时期之间的空白，使已经灭绝的物种和现存物种之间形成渐进的协调关系。在某些最新的地层中（如果以年为计算单位，无疑属于很古老的时期），只有一两个物种灭绝了，但也有一两个新物种——要么是在该处首次出现的地方性物种，要么是在整个地球表面首次出现的新物种。对于中生代地层来说，间断比较多，正如布朗所指出来的，在各个地层中埋藏的众多物种并不是同时出现和同时消失的。

如果物种是不同纲、不同属的，那么它们的变化速度和程度都会各不相同。在第三纪较古老的地层中，我们在许多灭绝的种属中可以找到少数现存的贝类。福尔克纳曾列举过一个与此相似的案例：在喜马拉雅山下的沉积物中，人们发现了一种现存的鳄鱼，与此同时，还发现了许多已经灭绝的哺乳动物、爬行动物。就志留纪而言，海豆芽和该属现存物种之间的差异特别小，但是其他软体动物和一切甲壳动物却发生了巨大的变化。人们发现瑞士曾经出现过一种情况，陆相生物的变化速率好像比海相生物的快。我们有理由相信，相对于低等生物，高等生物的变化速率要快得多，尽管也有例外。正如皮克特所言，生物的变化量在各个连续的地层里是不相同的。然而，如果我们仔细比较任何有密切关联的地层就会发现，所有物种都或多或少发生了改变。一旦某个物种在地球上绝迹，我们就不会再相信能有同样的类型重现。不过对于前一句所阐明的规律而言，还存在一个例外的情况，即巴兰得的“殖民团体”。在某个时期，这种“殖民团体”侵入较古老的地层，使得过去存在过的动物群重新出现；然而，莱伊尔的解释似乎更令人满意——这是一个物种从

不同地区暂时迁入的情形。

以上几个事实都与我的学说一致。我的学说不包括神创论中那些一成不变的规律，即不主张某个地区的所有生物会同时发生变异或者突然发生同样程度的变异。物种变异的过程非常缓慢，而且由于每个物种的变异性是独立的，与其他物种没有关系，因此通常在一个时期内，受到影响的物种只有少数几个。至于经过自然选择作用进行积累后，物种的变异或是个体差异是否会成为永久性变异，则取决于许多复杂的偶然因素——变异的性质是否对生物有利，自由交配的难易程度，地方性自然条件的缓慢变化，新物种的迁入，以及竞争强度，等等。总体而言，相比于一个物种发生变异的时间，其保持原状态的时间要更长一些，而且显而易见的是，即使这个物种发生变异，其改变的程度也很小。我们可以在不同的地区的现存生物中看到此类情况。例如，马特拉岛陆相贝类和鞘翅类昆虫与欧洲大陆上的近亲相比，具有很大的差异；而该岛海相贝壳和鸟类却没有什么变化。根据前一章的内容我们知道，高等动物和其周围生活条件的关系非常复杂，由此我们也可以理解，为什么高等生物和陆相生物的变异比海相生物或低等生物的变异快得多。当某个地区的多数生物已经发生了变异和改良，根据竞争原理和生物之间生存斗争的重要关系，可以判断，不管什么生物，如果不发生某种程度的变异和改良，就可能会灭绝。由此看来，只要我们在一个地区观察足够长的时间，就会明白为什么所有物种迟早会变异——因为如果不变异，就会灭亡。

在相同的时期，同一纲的不同物种出现的平均变异量近似相同。但是，由于大量沉积物在地面下沉地区的堆积情况是形成富含化石、历时久远的地层的关键因素，现在的地层几乎都是经过长期而又不相等的时间间隔才堆积起来的，由此造成埋藏在连续地层内的化石物种表现出不同的变异量。依据这个观点，每个地层所代表的不是一种完整的新创造，只不过像一出缓慢推进的戏剧中偶然出现的一幕。

我们现在完全明白，为什么一旦一个物种灭绝后，尽管再遇到同样的生活条件，就绝不会再次出现。虽然一个物种的后代能够适应另一物种的生活条件，从而占据另一物种在自然界中的位置并排挤它（可以确定的是，这种情况出现过很多次），但是这两个物种绝不会完全相同，

因为它们已从各自不同的祖先那里继承了不同的特征。既然两个物种本身各不相同，那么它们变异的方式也就自然不一样。例如，假如所有的扇尾鸽灭绝了，养鸽人可能会培育出一个和之前的品质很相似的新品种；然而，如果原种岩鸽也灭绝了，那么我们有充分的理由相信，改良过的后代鸽终会替代原种岩鸽，并使之灭绝。想要从其他鸽种或者家鸽中培育出与现存扇尾鸽相同的品种是非常困难的，因为在某种程度上，连续的变异肯定有所区别，而新变种可能从祖先那里继承了某些特有的差异。

属和科是物种的集合，它们出现和灭绝的规律和单个物种相同，变异的过程有快有慢，变异程度也有大有小。一旦某个物种群灭绝了，就绝不能再出现；换句话说，不论物种延续了多长时间，它都是连续存在的。虽然存在非常罕见的例外情况，但是福布斯、皮克特和伍德沃德（虽然他们竭力反对我的观点）都承认这一规律是正确的。而且，这一规律完全符合自然选择的学说。不论同一群的所有物种延续了多长时间，它们都是源自同一个祖先。例如，从早寒武纪到现在，各个地质时期都出现了海豆芽属的新物种，那么必然有一个连续不断的世代顺序把这些变异的后代联结起来。

我们已经在上一章中讨论过，成群物种有时会出现突然发展的假象。如果这种事情属实，我的学说将遭到致命的打击。不过，这些事绝对是例外情况。通常的规律是，物群的数目先逐渐增加，等达到最大限值后，（时间上或早或迟）又逐渐减少。如果将一个属内物种的数目与存在时间用一条线段来表示——线段的长度代表物种或属出现的连续地层，线段的粗细代表物种或属的多寡。有时，线段下端起始处会表现出不是尖细的而是平截的，让人误解；随后，线段上升并逐渐加粗，同一粗度往往可以保持一段距离，在上面地层中逐渐变细，直到完全消失，这表示此物种逐渐减少，以至灭绝。在这种情况下，某个类群的物种数目逐渐增加，这和我的观点是完全符合的，因为同属的种或同科的属，只能缓缓地增加。变异的进行和一些近缘物种的产生，必然是缓慢和渐进的过程——就像一条树干上抽出了许多枝条并最终变成一棵大树一样，一个物种最初会产生两三个变种，这些变种慢慢形成新的物种，然后又经过同样缓慢的过程产生其他变种，以此类推，直到变成大群。

灭绝

我们在上文谈到了物种和物种群的消失。根据自然选择学说，旧物种的灭绝和进化过的新物种的产生，二者之间的联系十分密切。曾经有一个旧观念——“认为地球上所有生物，在前后相连的时代里曾因多次灾变而几度消失”，现在人们普遍否定这一观念，包括埃利·得博蒙、莫企逊、巴兰得等地质学家；依据他们平素所持的观点，自然会得出这个结论。与此相反，通过对第三纪地层的研究发现，物种和物种群的消失都是一个接一个地逐渐发生的：最初是在一个地点，然后在另一地点，最后扩散到整个地球。但在少数情况下，例如由于海峡的断裂，促使许多新的生物侵入邻海；或者由于海岛的下沉，可能会加快灭绝的过程。无论是单一的物种还是成群的物种，它们持续的时间都不相同。正如我们看到的那样，有些物种群从已知最早生命开始的时代起，一直延续到今天；也有些物种群在古生代末就消失了。由此看来，某个物种或某个属能够延续多长时间并不是由某个特殊规律来决定的。我们相信，相比于整个物种群的形成过程，它们全部灭绝的进程要缓慢得多。假如用前面提到的粗细不等的线段来表示物种群的出现和消失，那么线段上端逐渐变尖的速度（表示物种灭绝的过程），要比线段下端变尖的速度（表示该物种最初出现和早期数目的增加）慢一些。不过，在某些情况下，成群物种的灭绝就像菊石在中生代末期的灭绝一样，发生得很突然。

物种的灭绝曾经是一个令人疑惑的难解之谜。有的学者甚至假定，既然生物个体有一定的寿命，那么物种的存在也应当有一定的期限。对于物种的灭绝，恐怕没有人会比我更感到惊奇了。当我在拉普拉塔发现乳齿象、大懒兽、箭齿兽及其他已灭绝的动物遗骸的同时，竟然发现了一颗马的牙齿，而且它们又和现存贝类一起在最近的地质时代共存，我感到十分惊诧；自从西班牙人将马引进南美洲后，马就变成了野生的，并且迅速繁衍增长，很快就遍及整个南美洲。我不解的是，在这样极其适合马生存的环境下，为什么以前的马还会消亡呢?我的惊诧并不是没有任何道理的。

很快，欧文教授发现，虽然这个马的牙齿和现代的马很接近，但它其实属于一种已经灭绝了的马。假如现在仍存在极少量的这种马，任何

博物学家都不会因为它的数量之少而惊讶，因为无论在什么地方，各纲中难免存在数量极少的物种。如果要问为什么某些物种的数量极少，答案是因为它的生活条件中有某些不利的因素。然而究竟是什么不利的因素，我们很难给出确切的回答。假如那种化石马现在仍以稀少物种的形式存在，根据它与其他哺乳动物的类比，并参考南美洲家马的驯化历史，我们推测：如果它处于更合适的环境条件下，不出几年，便会遍布美洲大陆。我们不确定的是：究竟是什么阻止了化石马的繁衍，是一种还是几种偶然的因素起了作用，是在马有生之年的哪一个时期起的作用，各因素作用的程度如何，等等。如果这些因素对化石马越来越不利，无论它们变化得多么缓慢，化石马的数量都会逐渐减少，直至灭绝，它在自然界中的位置就会被生存竞争的胜利者所取代。

每一种生物的繁衍都会受到难以察觉的不利因素的影响与制约，这是人们容易忘记的事情。由于这种难以察觉的不利因素，物种逐渐变得稀少，直至灭绝。人们对于这个问题也所知甚少。我经常听到有人对体形庞大的怪物，例如乳齿象和更古老的恐龙的灭绝表示十分惊奇，好像只要某一物种拥有庞大的身躯，就能轻易地在生存竞争中取得胜利。与此恰恰相反的是，正如欧文所说，在某些情况下，某些物种的体形过于庞大，需要的食物很多，反而加速了它走向灭绝的进程。在尚无人类出现之前的印度和非洲，肯定有若干因素阻止了现代象的继续繁衍。福尔克纳博士是一位著名的分类学家，他认为阻止印度象繁衍的主要原因是昆虫没完没了的折磨，导致现代象日趋衰弱。布鲁斯通过观察阿比西尼亚的非洲象，也得出了相同的结论。在南美洲的几个地区，体形庞大的四足兽类的生杀大权确实掌握在昆虫和吸血的蝙蝠手里。

我们在较近代的第三纪地层中发现了许多物种逐渐减少直至灭绝的情况。同时，我们也十分清楚地了解到，由于人类的出现和作用，导致一些动物也出现了这样的情况。在这里，我要重申在1845年提出的观点，即物种在灭绝之前，会先逐渐变得稀少。当一个物种变得稀少时，我们并不感到惊奇，等到这一物种灭绝后才大为惊异。这正如我们承认疾病是死亡的警钟，当有人生病时，我们往往不觉得奇怪；可当病人死亡后，我们会感到惊奇，甚至怀疑他是死于横祸。

自然选择学说的基础是：之所以每个新变种能够成为一个新物种，

并延续下来，是因为它比竞争者占有某些优势；而劣势物种的灭绝似乎是必然发展的结果。家养动物也是如此。当一个稍有改良的新变种被培育出来之后，它首先会排挤周围改良较少的变种，等到占据极大的优势后才会传播开来，就像短角牛那样，被运送到各地取代当地的原种。因此，不论新类型的出现和旧类型的消失是自然产生的还是人为导致的，都是相互关联的。在一定时期内，繁盛的物种群里产生的新物种要比灭绝的旧物种多。然而我们知道，物种并不是无限制地增加的，至少在最近的地质时代是如此。我们通过观察近代的情况可以发现，新类型的产生导致了与此数目接近的旧类型的灭绝。

一般来说，各方面彼此最相似的类型，彼此之间的竞争也最激烈，前文已经对此举例说明过。这样一来，某一物种的变异后代往往会给亲种招来灭顶之灾；从另一方面来说，如果许多新类型是由某一个物种发展而来的，那么与这个物种亲缘最近的物种（即同属物种），最容易灭绝。同样的道理，同一物种传衍下来的许多新物种所组成的新属，将会排挤同科内原来的属。不过我们也常常会发现，某一类的某个新种取代了另一类的某个物种而使它灭绝。如果很多近似的类型是由入侵者发展而来的，那么必然有很多类型被排挤并失去原有地位，尤其是那些与入侵者相似的类型，由于继承了祖先的某种劣势而受到排挤。然而，被入侵者取代的那些生物，不管是同纲还是异纲，总还有少数物种可以延续很长一段时间，这是因为它们可以适应某种特殊的生活环境，或者生活在遥远而隔离的地区，得以逃避激烈的生存斗争。例如中生代贝类的三角蛤属，是一个大属，在澳洲的海洋里仍残存着它的一些物种。又如硬鳞鱼类，曾经濒临灭绝，但是如今仍有少数物种生活在淡水中。通过这些事实可以得知，相对于一个物种群的产生，一个物种群完全灭绝的速度要更慢一些。

我们在前文也讨论过整科物种或整目物种突然灭绝的情况，例如古生代末期的三叶虫和中生代末期的菊石等。连续地层之间可能存在长久的时间间隔，而在这些间隔期，物种灭绝的速度可能非常缓慢。此外，当一个新物种群里的许多物种突然迁入某地，或者以异常快速的发展占据某个地区的时候，多数老物种就会以相应的速度灭绝。而这些被排挤掉的老物种，往往是带有共同劣势的近似类型。

根据以上事实，我得出结论，单一物种和成群物种的灭绝方式都是完全符合自然选择的学说的。我们不必因为物种的灭绝而诧异。就算真要诧异，也应该诧异的我们仅凭想象就自以为弄明白了物种生存所依赖的各种复杂、偶然因素的做法吧!每个物种都可能会繁衍过度，但同时也存在不为人知的抑制作用。如果我们不重视这一点，就完全无法理解自然界生物组合的奥秘。等到需要确切地解释为什么这一物种的数目比那一物种的数目多，为什么这一物种能在某地区驯化而另一种不能时，我们才会由于解释不了单一或整群物种的灭绝而感到诧异!

全世界生物演化几乎同步发生

对于古生物学来说，几乎没有任何一个发现，比全世界生物几乎同步演化的事实更令人激动的了。即使两个地区相距遥远且气候差异极大，例如南北美洲的赤道地区、火地岛、好望角和印度半岛，尽管我们在这些地方没有发现白垩纪矿物的碎块，也能辨认出与欧洲白垩纪类似的地层。在这些相距遥远的地方的某些地层里，生物遗骸与欧洲白垩纪地层里的化石明显相似。不过，这并不意味着它们是相同的物种，只可能是同科、同属、同亚属的物种。在某些情况下，根本没有真正相同的物种，只有一些诸如表面的装饰等细微的相同之处。此外，欧洲白垩纪地层的下伏和上覆岩层中的生物类型（欧洲白垩纪地层中没有）在这些遥远的地方也按相同的顺序依次出现。某些权威学者在俄罗斯、西欧和北美古生代的连续地层中观察到了生物的相似平行发展现象；据莱伊尔所说，欧洲和北美洲的第三纪沉积地层也出现了相同的情况。即使除去欧洲和北美洲共有的少数化石物种，古生代和第三纪各时代相继出现的生物序列也有明显的普遍平行性，很容易确定各个地层间的相互关系。

然而，这些观察都和全世界的海相生物关联密切。我们还没有充分的证据，可以判断相隔遥远的陆栖生物和淡水生物是否有平行演变的现象。但是我们可以怀疑，它们是否经历过这样的平行演变：如果把大懒兽、磨齿兽、长头驼（马克鲁兽）和箭齿兽从拉普拉塔迁移至欧洲，但不说明它们在地质上的位置，那么可能没有人会想到，它们曾和现存海相贝类同时存在，也曾和乳齿象、马同时存在，我们至少可以由此推测，它们曾经在晚第三纪存在过。

海相生物的演化曾在全世界同时发生，这里并不是指在同年或同一世纪发生的，也不是指在某一严格的地质时间同时发生。如果对比现存于欧洲的海相生物和更新世（如果以年来计算，这是一个包括整个冰河时期的远古时期）的海相动物，以及南美洲、澳洲现存海相动物，即使是最富经验的博物学家，也无法弄清楚与南半球动物最为相似的是欧洲的现代动物，还是欧洲更新世的动物。还有几位观察家认为，美国现存的生物和欧洲晚第三纪生物之间的关系，相对于它们与欧洲现存生物之间的关系更为密切；如果这种情况属实，那么显而易见的是，北美洲海岸沉积的化石地层将要被和欧洲较老（晚第三纪）的化石地层划为同类。然而，对于遥远的未来说，可以肯定，一切近代的海相地层——欧洲、南北美洲和澳洲的上新世的上部地层，更新世和真正的现代地层，由于它们都含有类似的化石遗骸，并且都未发现更加古老的下层里的化石类型，因此它们在地质学意义上都应该被划为同一时代的地层。

德·万纳义和达尔夏克等优秀的观察家，曾经对于生物在世界各个相距遥远的地方发生广义的同时演变这一事实感到非常激动。在讨论欧洲各地古生代生物的平行演变现象时，他们说："如果我们对这种奇特的顺序感兴趣，将目光转向北美洲，并在那里发现一系列与此相似的现象时，就可以断定，物种的一切变异、灭绝及新物种的产生，显然不只是海流的改变或其他局部的暂时因素引起的，而是由支配整个动物界的总法则影响并造成的。"巴兰得先生也认同这一观点。确实，如果把世界各个气候极不相同地区生物类型发生巨大变化的原因归于洋流、气候或其他物理条件的变化，这是很不妥当的。正如巴兰得说的那样，必须寻找某些特殊的规律。当我们谈到生物的现代分布情况，看到各地区的自然地理条件与生物本性之间的关系并不十分紧密时，便可以更清楚地理解上面的观点。

可以用自然选择学说来解释全世界生物发生平行演化这一重要事实。之所以可以形成新物种，是因为它们比旧物种具有某些优势，能够产生最大数目的新变种或早期的新物种。对此，我们可以从植物中找到十分明显的证据：那些最普通、分布最广、产生变种最多的植物，往往占据优势地位。事实上，这也是非常普遍的自然现象。那些占有优势、分布广泛且已经侵入了其他物种领域的变异物种，一定有机会再向外扩

展，并在新的区域产生新变种和新物种。不过，由于受到气候与地理的变化、偶然的变故等诸多因素的限制与影响，这种向外扩展的过程往往十分缓慢，需要非常长的时间。但是随着时间的推移，占优势的物种一般都会取得分布上的成功。分隔的大陆上的陆相生物，其扩散过程可能比生活在连通的海洋里的生物慢一些。我们借此可以推测，相较于海相生物，陆相生物的演替平行程度可能没有那么密切，而我们观察到的情况也正是如此。

因此我得出结论，所谓生物类型的平行发展性，就是指全世界生物类型具有同时演变的次序，与新物种的形成原理（优势物种分布广、变异多）是完全吻合的。这样产生的新物种本身就具有优势。与曾占优势的亲种和其他物种相比，新物种具备了某些更加优越的条件，因而也就会进一步向外扩展，继续变异并产生更新的类型。那些失败的、被排挤掉的旧类型，可能都是近似的种群，它们继承了某种共同的劣势。所以，当改良了的新物种群广泛分布于世界各地时，旧的物种群就消失了。因此，从开始出现到最终灭绝，世界各地生物类型的演替往往是同步进行的。

有关这个问题，还有一点值得大家注意。我相信，大多数富含化石的巨厚地层是在下沉时期形成的；而不含化石的地层，则是在空白极长的间断时期（即海底静止或上升时，以及沉积速度不足以埋藏和保存生物遗骸的时期）形成的。我猜测，各个地区的生物在这极长的空白时期肯定有大量的变异和灭绝，也有很多物种从其他地方迁移而来。我们有理由相信，同一个地质运动会对很多地区产生影响，所以在广阔空间里，可以有同时沉积的地层。然而，我们无法断定这种情况是否一成不变，也无法断定广大地区是否总会受到相同地质运动的影响。如果在两个地区，有两个地层几乎是同时沉积（但不是绝对同时沉积）形成的，那么根据前文可知，这两个地层里应该存在相同的生物类型的演替情况。

这种情况可能会出现在欧洲。普雷斯特维奇先生在有关英法两国始新世地层的著作中发现，两国连续地层之间存在着密切的总体平行现象。但是，当他详细对比英法两国的某些地层时又发现，虽然两地同属的物种数目一致，类型却有所不同。除非有一个海峡将两个海隔离开

来，使两个海中不同的物种群同时生存，否则，英法两国的距离如此之近，实在很难解释清楚这种差异。莱伊尔对于第三纪晚期地层进行了类似的观察。巴兰得也指出，波希米亚和斯堪的纳维亚志留纪的连续地层之间，也有明显的总体平行现象，不过他发现两地物种之间有着非常大的差异。假如这几个地区的地层不是绝对同时沉积的——这个地区的地层正在形成，而那个地区却处在空白的间断期——并且两地区物种也在地层沉积期间和长久的间断期间缓慢地交替变化着，在这种情况下，按照生物类型总的演替状态，两个地区的各个地层可以大致排列出同样的顺序，表现出绝对平行的假象。尽管两个地区的各地层相应层次明显相同，但其中所包含的物种却不一定完全相同。

灭绝物种之间的亲缘关系及其与现存物种之间的亲缘关系

现在，我们来探讨灭绝物种与现存物种之间的亲缘关系。所有的物种都可归纳为几个大纲，并且这一事实可以依据生物传衍的原理来解释。按照一般规律，物种越古老，和现存物种之间的差异也就越大。但是，正像巴克兰以前讲的那样，灭绝的物种不是归于现在的类群里，就是归于灭绝与现存之间的类群里。显而易见的是，灭绝的生物类型可以填补现存的属、科、目之间的空白。然而，人们常常忽略甚至否定这一说法，在这里，我要举例说明一下。如果我们将同纲的现存物种和灭绝物种分开进行研究，所得到的各自生物系列就不如将两者结合起来研究所得到的生物系列完整程度高。

我们经常在欧文教授的论文里看到，用概括型一词称呼灭绝物种；而在阿加西斯的论文里，则用预示型或综合型等词称呼灭绝物种。事实上，不论概括型、预示型还是综合型，它们所指的都是中间类型或过渡环节类型。著名的古生物学家戈德里在阿提卡发现了很多哺乳类动物化石，都是介于现存属之间的类型。居维叶曾经认为反刍类和厚皮是哺乳动物中差异最大的两个目。然而，根据挖掘出的许多过渡类型化石，欧文不得不对原有的整个分类法进行了修正，将部分厚皮类归并到反刍亚目中。例如，他借助中间递变类型，填充了猪和骆驼之间很大的间隔。有蹄类（或是长蹄的四足兽），现在被分为偶蹄和奇蹄两大类，而在某

种程度上，南美洲的长头驼把两大类联结起来了。三趾马是现代马和古代有蹄类的中间类型，已经没有人再否认了。杰尔韦教授命名的南美洲印齿兽是哺乳动物中最奇特的过渡环节类型，它不能归纳到任何一个现存的目中。海牛类是哺乳动物中的特殊种群，现存的儒艮和拉海牛的最显著特征是没有后肢。但是根据弗劳尔教授的说法，已经灭绝的拉海牛却有含骨质成分的大腿骨和“骨盆内很明显的关节”。这样一来，它就类似于有蹄的四足兽。就身体的其他构造来说，海牛类原本就与有蹄类近似。此外，鲸鱼类和其他所有的哺乳动物有着很大的差别。但是第三纪的械齿鲸和鲛齿鲸被几个博物学家列为单独一目，而赫胥黎教授认为它们肯定是鲸类，是“和海相食肉类形成相接的过渡环节类型”。

赫胥黎还认为，鸟类和爬行类之间的巨大间隔也以出人意料的方式部分地联结起来了—— 一边是鸵鸟和已经灭绝的始祖鸟，另一边是恐龙类中的细颈龙。恐龙类包括陆地上最大的爬行类。关于无脊椎动物，最有权威的巴兰得说，虽然古生代动物的类别确实可以归入现存的类群，但各类群之间的差别在古老的时代并不像现在那样明显。

把已经灭绝的物种或物种群当作现在某两个物种或物种群的中间类型，对此，某些学者持反对意见。如果“中间类型”一词是指一个灭绝类型在所有性状上都处于两个现存物种或物种群之间的话，这种反对可能是有一定道理的。然而在实际的分类系统中，许多化石物种的确介于现存物种之间，还有些灭绝的属介于现存的属之间，甚至介于不同科的属之间。我们最常见到在有着巨大差异的物种群中出现这种情况，例如鱼类和爬行类之间，如果假设这两个物种群现在有20个特征是不同的，那么在古代，它们之间有区别的特征就会少一些，也就是说，这两个物种群之间，古代的亲缘关系要比现代的更近。

人们普遍认为，生物类型越古老，它的某些特征将两个现存差异很大的物种群联结起来的可能性就越大。这个规律显然只限于那些在地质时代变化很大的物种群，并且很难证实其正确性，因为即使是美洲肺鱼这样的现存动物，也会不时地被发现它与几个差异较大的物种有亲缘关系。可是，如果我们分别对比古代的各类生物（例如爬行类、两栖类、鱼类、头足类以及始新世的哺乳类）和现代种属，就会发现这个规律是正确的。

现在，我们来分析上述事实和推论有多少是与生物的遗传演化理论一致的。这是一个比较复杂的问题，在此我必须请你参阅第四章里的图：假定标有数字的斜体字母表示属，从上字母画出来的虚线表示属里的各个物种。当然，这个图形的确过于简单，所画出的属和种的数目也太少，但是并不影响接下来的分析。如果图中的横线表示连续的地层，凡是最高横线下面的所有类型都是已经灭绝的物种。三个现存的属，a^{14}、q^{14}、p^{14}组成一个小科；b^{14}、F^{14}是一个近缘科或近缘亚科；而o^{14}、e^{14}和m^{14}则组成第三个科。这三个科和许多已经灭绝的属的共同祖先是A，可以组成一个目，因为它们从共同祖先那里继承了某些共同特征。按照前面此图所表示过的遗传性状不断产生分歧的原理，不论什么类型的生物，越是靠近近代的类型，和它古代原始祖先之间的差异也就越大。于是，我们可以明白这条“最古老的类型和现存类型之间差异最大”的规律。但是我们不能设想一定会出现性状分歧，因为这完全取决于某个物种的后代在自然组合中取得的位置。随着生活环境的细微改变，某个物种会略有改变，并在极长的时期内保持它原有的一般特征，这是有可能的，好像我们在志留纪所看到的某些类型一样。图内的F^{14}就是这种情况的代表。

正如上文所说，从A传衍下来的多个物种，不论是已经灭绝的，还是现存的，共同组成了一个目；因为有不断灭绝的物种和遗传性状分歧，这个目又形成了若干科和亚科。可以假定在这些科或亚科中，有一些已经陆续灭绝了，有一些则传衍并留存到现在。

我们再看一下第四章的图，就会发现： 如果在一套地层中，多个已经灭绝的类型处于这套地层的下部，那么这套地层最上面的三个现存科之间的差异就会小一些。例如，如果a^1、a^5、a^{10}、F^8、m^3、m^6、m^9等属已经被挖掘出来了，那么就可以把现存的三大科密切地联系起来，甚至可以将它们合并为一个大科，这就类似于反刍类和某些厚皮类的情况。但是有人否认灭绝属的中间性质，认为用灭绝属把三大现存科联结起来是错误的，这种意见有一定的道理，因为这些灭绝属是通过许多差异很大的类型间接地连接起来的，并不属于直接的中间类型。如果许多灭绝的类型都处于该图的一条横线上（即某个地层），例如第六条横线上面，而在这条横线之下（或这个地层之下）什么类型也没发现，那就

只有左边a^{14}等属和b^{14}等属的两个科可以合并为一大科，原来的三个科就成了两个科，这两科之间的差异比原来没有发现化石时要小。

还有，如果在最上面那条线上，由八个属（a^{14}到m^{14}）形成了三个现存科，假定这三个现存科之间有六个主要特征，可用来彼此相互区别，那么在第六横线所代表的地质时期，它们相互区别的特征数目要少于六，因为它们在进化的早期，从共同的祖先分出之后，分歧的程度比较低。因此，对于古老和灭绝的属来说，它们的性状或多或少地介于已经变异的后代或旁系亲族之间。

在自然界，由于实际物种群的数目要比上图显示的多得多，而且持续时间不同，变异的程度也各不相同，因此物种群的演化过程比上图中复杂得多。由于我们得到的地质记录极不完整，且只有最后一册，因而无法将自然界的间隔都填满，使不同的科或目联结起来。我们能指望的只是那些在已知地质时代发生过很大变化的物种群，它们在古老地层中的差异比较小。所以，在同一物种群的各个类型中，古老类型之间的性状差异要比现存类型小。这种情况是常常发生的，很多著名的古生物学家都证明了这一点。

由此一来，有关灭绝类型之间、灭绝类型与现存类型之间的亲缘关系的重要事实，都可以根据生物遗传演化的学说得到圆满的解释，而其他学说则根本做不到这一点。

显然，按照同一学说，生存在地球历史上任何一个长的地质时期内的动物，将是该时期以前和以后动物群的中间类型。因此，在第四章的图中，生存在第六时期（第六横线）的物种，既是第五时期物种已变异的后代，又是第七时期变异更多的物种的祖先，其性状特征介于前后两者之间。然而，我们也必须承认，会发生这样的情况：某些古老的类型已经完全灭绝了；任何地区都难免有从别处迁入的新类型；在连续地层之间的长期间断中，物种可以发生大量的变异。以上述各种情况为先决条件，每个地质时期动物群的性状特征肯定介于前后时期动物群之间。对此，有一个例子可以说明：当初古生物学家发现泥盆系地层时，立刻断定这个系的化石性状特征介于上覆的石炭系化石和下伏的志留系化石之间。不过，连续的地层中有不相等的间断时间，因此每一时期的动物

群并不一定呈现出绝对的中间性状。

就整体而言，尽管存在例外，但是每个时代的动物群在性状上介于前后时期的动物群之间是无法否认的事实。例如，福尔克纳博士曾用两种方法把乳齿象和普通象类进行排列：第一种是根据它们的亲缘关系；第二种是根据它们生存的时代。结果显示，二者并不吻合。具有极端性状的物种不一定就是最古老或最近的物种，具有中间性状的也不一定是中间时期的物种。但是在某种情况下，如果物种从出现到灭绝的记录是完整的（事实上，这种情况并不会出现），那么我们也没有理由相信，先后出现的各种类型会有相等的延续时间。一个非常古老的类型有时可能比别的地方后起类型延续的时间更长，特别是在隔离地区生活的陆相生物。对此，我们可举出一个例子来说明：假如把家鸽的现存品种和灭绝品种按亲缘关系排成谱系，这种排列顺序可能和各个品种的出现顺序并不一致，和它们的灭绝顺序就更不一致了，因为祖种岩鸽至今仍然存在，而许多岩鸽和信鸽之间的变种却已经灭绝了。鸽喙的长短是鸽子重要的性状特征，相比喙最短的极端类型短嘴翻飞鸽，喙最长的极端类型信鸽出现的时间要更早。

所有古生物学家还承认另一种观点，即两个连续地层里的化石间的关系，要比相距甚远的两个地层里的化石间的关系密切得多。这种说法与中间地层里的生物遗骸具有若干中间性状的观点不谋而合。皮克特举了一个大家都很熟悉的例子，即虽然白垩纪各个时期地层里的生物遗骸所属物种不同，但大致类似。这一事实具有普遍性，似乎动摇了皮克特教授“物种不变”的信念。凡是熟悉地球上现存物种分布的人，绝不会认为之所以紧密相连的地层中不同物种非常相似的情况，是因为古代各地区自然地理条件相似。我们要记住的是，全球的生物（至少是海相生物）几乎是同时发生变化的，并且是在极不相同的气候等条件下同时发生变化。仔细思考一下，整个冰期都处于更新世时期，气候变化非常大，可是观察到的更新世的海相生物受到的影响却微乎其微。

虽然紧密相连的地层里的化石遗骸被列为不同物种，但它们彼此之间十分相似。按照遗传演化的学说，其意义是显而易见的。因为各个地层的沉积常常有中断，连续地层之间也存在着长期空白间断。正如我在前文中所说，虽然无法在任何一两个地层中找到最初和最后出现物种之

间的所有中间类型，但是在间断时间之后（用年为单位计算时间是很长的，但用地质时期计算并不算太长），我们应该能找到非常近似的类型，或者是被某些学者称为代表种的类型。总之，我们已经如所期望的那样找到了物种缓慢变异的证据。

古代生物的进化状况与现代生物的比较

我们在第四章里已经说过，生物成熟之后各器官的分化和专门化程度，是衡量生物进化高低与完善程度的最好标准。并且，对每个生物来说，器官的专门化是有好处的，因此自然选择就促使每一生物的构造趋于专门化发展，越来越完善。从这个意义上说，生物趋向高等化了。为了适应简单的生活方式，自然选择使许多生物保留了原有的简单器官，甚至器官在某些情况下会退化。然而，这种退化生物也能够适应新的生活环境。另外更普遍的现象是，在生存竞争中，新物种必须战胜一切与之密切相关的老物种，从而使新物种比它们的祖先更优良。由此我们可以得出结论，如果始新世生物与现存生物在相似的气候条件下进行竞争，前者肯定会被后者打败或灭绝，正如中生代生物要被始新世生物打败或灭绝、古生代生物要被中生代生物打败或灭绝一样。这样一来，我们就可以根据生存竞争中成败的基本测验和器官专门化的标准推论出，近代类型的生物应当比古老类型的生物更加高等。事实果真如此吗?许多古生物学家都会做出肯定的答复，尽管难以进行验证。

自很早的地质时期以来，某些腕足类的变化非常微小；自出现以来，某些陆栖动物和淡水贝类几乎保持原状，这些情况和上面的结论并不矛盾。卡彭特博士曾说过，有孔虫类的构造从劳伦纪（前寒武纪的某一段时期）以来就没有出现任何变化。理解这个问题并不难，因为这些生物为了适应简单的生活方式，必须保持构造不变。低等构造的原始动物是达到这个目的的最佳选择。如果把构造的进化看作一种必要条件，那么上述事实将对我的学说造成致命的打击。如果可以证明有孔虫类出现于劳伦纪，或者腕足类出现于寒武纪，那么这些异议也同样会对我的学说产生严重威胁，因为在这种情况下，这些生物尚无足够的时间进化到当时的标准。根据自然选择学说，凡是生物进化到某个特定的标准，便无须再进化了，即便它们在其后各个连续时代里略有变异，以适应不

断变化的环境，保住自己的地位。上面所说的几个事实的关键在于：我们是否真的知道世界的年龄?各种生物究竟是从什么时候开始出现的?这些问题可能会引起很大的争论。

整体来看，无论生物的构造是否进化，都是一个十分复杂的问题。任何时代的地质记录都不完整，无法追溯到远古，也就很难证实生物的构造在漫长的历史中确实发生了很大的进化。即便是现在，到底应该把同纲的哪个类型列为最高等，博物学家也存在着很大的争议。例如，有人认为最高等的鱼类是板鳃类即鲨鱼类，因为它们的某些重要构造和爬行类的一致；另外有些人则认为硬骨鱼才是最高等的鱼类。硬鳞鱼的地位介于鲨鱼和硬骨鱼之间。目前，硬骨鱼的数目是最多的，但以前却只存在鲨鱼和硬鳞鱼两类。在这种情况下，由于所选择的标准不同，从而产生了不同的结论：有人认为鱼类的构造进化了，有人认为退化了。将不同大类之间的成员进行等级高低的比较是不可能的，谁能够决定乌贼和蜜蜂谁更高一等呢?著名学者冯贝尔认为，蜜蜂这种昆虫“虽属另一种类型，但比鱼的构造更高等”。可以推测，在本纲地位并不太高的甲壳类，一定会在激烈的生存竞争中战胜软体动物中最高等的头足类；尽管这种甲壳动物没有高度进化，但是如果用所有检验中最有权威性的优胜劣汰法则来衡量，甲壳类在无脊椎动物中占有很高的地位。当判断哪些类型的构造最为先进时，我们不应该只对比两个时代某个纲中最高等级的成员（虽然这肯定是判断高低的一个要素，也许是最重要的因素），而应该对比两个时期内的一切成员。在古代，软体动物中的最高等头足类和最低等腕足类都很繁盛（现代生物学认为，腕足类不应该包括在软体动物门中，而是应该单独列为一个门），而现在这两类都大为减小，其他具有中间构造的种类却大幅度增加。因此，有的博物学家认为，相较于以前的软体动物，现在的软体动物退化了。另一方面，也有人举例证实，腕足类的数目已大为减少，虽然现存的头足类数目不多，但结构却比古代的头足类进化很多。我们还应该比较两个时期的高等和低等动物在全世界所占的比例。例如，现在生存着5万种脊椎动物，假如已知过去某个时期只存在1万种，那么我们就应该把高等动物的增加（这意味着低等动物的减少）作为世界上生物构造具有决定性的进化标志。因而我们就会明白，要想在这种极端复杂的情况下正确对比各个时期动物群的构造，是多么困难啊!

为了对上述困难有更清楚的认识，我们可以再研究一下现存的动物群和植物群。近年来，欧洲的生物传入新西兰之后，以极快的速度传衍并占据了当地许多原生物种的地盘，我们有理由相信，如果把英国所有的动植物都迁移至新西兰，任它们自由生存，随着时间的推移，其中必有许多生物可以完全适应新西兰的环境，并导致许多原生物种灭绝。另一方面，由于缺乏实例证明南半球生物曾在欧洲任一地区成为野生种，我们因此怀疑，如果把新西兰的所有生物迁移至英国，它们是否真的能生存下来并夺取英国原生物种的地盘。从这一点来看，英国生物的等级远远高于新西兰的生物。然而，在研究两个地区的物种时，即便是最有经验的博物学家，也很难预料到这种结果。

阿加西斯等学者曾断言，古代生物的胚胎在某种程度上与现代同纲动物的胚胎具有相似性；而灭绝物种在地质上的传衍情况，也与现存物种胚胎发育情况类似。这和我的学说完全吻合。在下一章里，我们将说明生物的成体与胚胎之间的差异，是由于变异不在胚胎发育的早期发生，而是出现在相应的年龄阶段所造成的。在这个过程中，胚胎几乎保持不变，而生物成体在传衍的世代中的差异却不断增大。因此，胚胎好像是自然界保留下来的一幅图画，描绘出物种变异较少时的状况。这种说法可能是正确的，但永远无法证实。例如，观察一下那些最古老的哺乳类、爬行类和鱼类等纲的化石，虽然它们之间的差异比现存同类典型代表的差异小，但很难找到具有脊椎动物共同胚胎特征的动物，除非在寒武纪地层的最底部找到富含化石的地层，而发现这种化石层的机会是很渺茫的。

晚第三纪同一地区同一类型生物的演替

多年以前，克利夫特先生曾在澳洲山洞里发现了一种哺乳动物化石，和现存有袋类非常相似。人们曾在拉普拉塔河谷找到了和犰狳类的甲片相似的巨大兽甲，即使是从未受过训练的人也能看出来。欧文教授也曾指出，拉普拉塔地区埋藏的哺乳动物化石，大都属于南美洲类型。伦德和克劳森在巴西山洞里收集了大量骨骼化石标本，可以更清楚地显示这种相似关系。这些事实都给我留下了深刻的印象。在1839年和1845年，我曾明确地提出“类型演替规律”，即“同一大陆上的灭绝物种

和现存物种之间存在着奇妙的相似关系。”后来，欧文教授将这一规律推广应用到欧洲的哺乳动物中，并且利用它复原了新西兰已经灭绝的巨鸟。巴西山洞里的鸟类化石也存在相同的情况。伍德沃德先生表明，这个规律同样适用于海相贝类，只不过大部分软体动物分布广泛，致使这个规律不太明显。我还可以列举其他的例子，比如马德拉地区陆相贝类的灭绝种和现存种的关系、亚拉尔里海咸水贝类的灭绝种与现存种的关系等。

同一地区同一类型生物的继承发展规律究竟意味着什么呢?如果有人对比了处于同一纬度的澳洲和南美洲部分地区的气候，打算用自然地理条件的不同来解释两大洲生物的差异，或者用自然地理条件的一致来解释第三纪末期各个大陆上同一类型生物的相似性，这未免太草率了。当然也不能认为有袋类仅产于澳洲，贫齿类和其他美洲型动物仅产于南美洲。我们知道，古代欧洲存在过许多有袋类；我在前文中也曾指出，在从前和现在，美洲的哺乳动物的分布情况是不相同的。以前北美洲的生物群具有现代南美洲生物群的特征，以前南北美洲生物群的关系要比现在的更加密切。根据福尔克纳和考特利的发现可以知道，相较于现在来说，从前印度北部和非洲所产的哺乳动物之间的关系更密切。海相动物在分布上也有一些相似的事例。

如果参照遗传演化学说，我们就能立刻理解同一地区同一类型生物持久地（而不是永久不变地）继承演化这一重要规律。世界各地的生物都有将与它们近似但又略有变异的后代留下来的明显倾向。如果从前两个大陆上的生物的差异原本就很大，那么它们变异了的后代将会以同样的方式和同样的程度发生更大的变异。然而，经过很长的时间后，尤其是经过巨大的地理变迁且大量生物相互迁移后，那些入侵的优势类型便会排挤原有的弱小类型，从而使生物的分布发生变化。

有人开玩笑地问，是否可以假设像树懒、犰狳、食蚁兽等，是以前在南美洲生存的大懒兽及其他相似的巨大怪物遗留下的退化了的后代？我对这种想法是绝对不认同的。因为这些巨大动物没有留下后代就已全部灭绝了。不过，在巴西的山洞里发现了许多灭绝的物种，在个体大小和其他所有特征上与南美洲的现存物种非常相似，其中有些物种可能就是南美洲现存物种的真正祖先。我在前文中曾反复强调，同属的一切物

种都来源于某一个共同的祖先。因此，如果在某个地层里有六个属，每个属有八个种，而在该地层之后的连续地层内又发现六个相似的代表属，每属也有八个种。由此可以推断，一个老属里一般只能有一个物种留下后代，并形成含有几个新种的新属，而其余老属里的七个物种则全部灭绝。事实上，更加普遍的情况是：六个老属可以保留两个或三个属，每个属又可以保留两个或三个物种并形成新属，而其余的老属和物种则会全部灭绝。南美洲的贫齿类等不繁盛的目，其属和物种的数目会逐渐减少，只有极个别的属或物种能够保存并留下变异了的后代。

上一章与本章摘要

我已经说过，地质记录是非常不完整的，科学家们只对地球上的极少部分地区做过详细的地质调查。只有几个纲的生物以化石的形式大量保留下来。即便只和某一个地层中的世代生物数量相比，现在我们博物馆里收藏的标本和物种的数目也少得可怜，甚至几乎等于零。在多数连续地层之间，肯定存在长时期的间断，因为只有在海底下沉时期，才会形成富含化石的、足以经受住未来侵蚀作用的厚重沉积地层。在海底下沉时期，可能灭绝的物种比较多；而在海底上升期间，物种变异较多，但地质记录保存得更加不完整。每个地层都不是连续不断地沉积的，而且各个地层持续的沉积时间可能要比物种的平均寿命短一些。在任何地区或地层中，新类型的出现往往和生物的迁徙有着紧密的联系。变异最频繁、经常产生新种的那些物种往往分布的范围最广。变种最初是地方性的。最后一个要点是：　　每个物种的形成都必须经过无数中间过渡阶段。如果用年代来计算，这些演变的过渡时期是很长的；但如果与物种保持不变状态的时间相比，则又很短。假如把上述因素综合起来，我们就可以很容易地理解，为什么没有找到无数的中间变种（虽然已找到许多环节类型），使所有灭绝物种和现存物种之间通过差异细微的递变类型连接起来。还有一点应该牢记的是：人们可能会发现，两个类型之间的任何过渡环节类型，但如果没有完整的演化链条，那么这个中间环节类型就会被当作新的物种，因为我们尚无任何确切的标准来区别物种与变种。

当然，只要是不同意“地质记录是不完整的”这一观点的人，也不会

赞同我的学说。他会有这样的疑问：在同一套地层的各连续层位里，那些由近缘或代表物种组成的无数中间过渡类型究竟在哪里呢?他不会相信，在连续的地层之间曾有极长的间断时期。当他研究任何一个大的地层时（如欧洲的地层），往往会忽视生物迁徙的重要作用。他也会强调，成群生物是突然出现的（这往往是假象）。他还会问：在寒武纪沉积之前，曾生存过的无数生物遗骸又在什么地方呢?现在我们已经非常清楚，当时至少有一种动物存在过。不过，对最后一个问题，我只能根据以下的假设来回答，即现在是海洋的地区，在很久以前就是海洋；自寒武纪开始以来，现在能够上升、下降的大陆地区就已经存在了。而在寒武纪之前的远古时期，世界的景观和现在的景观完全不一样。至于更为古老的大陆，组成它的地层或者已成为变质岩遗留下来，或者仍埋藏在海洋下面。

如果弄清楚了以上这些问题的答案，其他古生物学上的主要事实都和遗传演化学说十分吻合。于是我们可以明白，为什么会缓慢而不断地产生新物种，为什么不同纲的物种不一定同时、同速度、同等程度地发生变异。然而，在很长时期内，所有物种终究都产生了某种程度的变异。老类型的物种的灭绝几乎是新类型物种产生的必然结果。我们也可以明白，为什么物种一旦灭绝之后就再也无法重现。因为物种的变异过程肯定是缓慢的，并受到很多复杂偶然事件的影响，所以物种群的数目是缓慢增加的，各个物种延续的时间也不相等。凡是属于大物种群里的优势物种，倾向于传衍许多变异后代，以组成新的亚群和新物种群。等到这种新物种群形成之后，由于从一个共同的祖先那里遗传了劣性，处于劣势群的物种将会全部灭绝。然而，成群物种的完全灭绝是个非常缓慢的过程，因为常有少数后代居留在被保护和隔离的地方，从而得以残存下来。一旦一个物种群完全灭绝，就不会再重现，因为世代传衍的链条已经断了。

我们能够明白，为什么分布广、变种多的优势类型，它们变异的后代具有扩散到全世界的倾向，因为在生存竞争中，这种后代通常能打败并排挤掉劣势物种群。因此，经过了很长的时间后，世界上的生物就会好像同时发生了变化似的。

我们也明白，为什么从古至今的所有生物总共只归为很少的几个大

纲。我们还明白，由于不断发生性状分歧，为什么越是古老的类型，与现存类型之间的差异就越大；为什么常有古老的已灭绝的类型能把现存类型之间的形态学差异填充起来，使两个物种群的关系更为接近，甚至还可以使原先认为不同的两个物种群合并为一。类型越是古老，它们在现存不同物种群之间处于中间地位的程度就越高，因为类型越古老，就和现在差异极大的物种群的共同祖先的亲缘关系越接近、性状也越相似。很少有已灭绝的类型直接处于现存类型之间，而是间接地通过其他灭绝类型迂回地介于现存类型之间。我们可以清楚地知道，为什么密切相连的地层中，生物遗骸非常相似，是因为世世代代的遗传演化把它们紧紧地联系起来了。我们还能更加清楚地知道，为什么中间地层里的生物遗骸具有中间性状。

在地球的历史上，各个连续时期的生物在生存竞争中打败了它们的祖先，因此后代一般比祖先更高等，构造上也更专门化，这也是许多古生物学家都相信生物的构造总体上是进化的原因。灭绝的古代动物在某种程度上和近代同纲动物的胚胎相似，这种奇怪的事实可以按照我们的学说得到很简单明了的解释。在较晚的地质时期，同一地区、同一类型生物构造的遗传演化已经不再是神秘的事情，而是可以按照继承原理很容易理解的。

如果人们相信地质记录不完整，对于自然选择理论的异议就会大幅度减少，甚至完全消失。另一方面，我认为所有古生物学的主要规律都清楚地表明，物种是经过普通的生殖方式形成的。之所以被改良过的新类型会取代老类型，是因为改良过的新类型是变异的产物，生存能力更强。

第十二章：生物的地理分布

地球表面各地生物的相似与否无法通过气候及其他自然地理条件得到圆满的解释，这让我们感到惊奇。近年来，几乎所有研究这个问题的学者都得出了一致的结论。仅仅以美洲的情况来进行研究，就能证明这一结论的正确性，因为除了北极和北温带外，所有学者都认为，美洲和欧洲之间的区别，是地理分布上最主要的区别之一。然而，如果我们从美国中部一直走到最南端，会发现自然地理条件各不相同：湿地、沙漠、高山、草原、森林、沼泽、湖泊和大河，各种气候条件几乎应有尽有。和欧洲一样，美洲也几乎有同样的气候和自然地理条件，至少有适合同一物种生存需要的非常相似的条件。毋庸置疑，欧洲的几个小地方，气候比美洲任何地方都热，但是在那里生存的动物群，和生存在周围地区的动物群并没有什么区别，因为一群动物只生存在某个特殊地区的情况是很罕见的。虽然欧洲和美洲的自然条件总体相似，但两地的生物却很不相同。

如果我们把处在纬度25°到35°之间的澳洲、南非洲和南美洲西部的广阔大陆进行比较，就会发现某些地方的自然条件十分相似，但它们拥有的动植物群之间却存在巨大差异，其他地方都无法和这三大洲相比。我们再对比一下南美洲南纬35°以南的生物和南纬25°以北的生物，尽管两地之间相距10°，也具有很不一样的自然条件，但是彼此的生物关系却很相近，甚至比气候相似的澳洲或非洲的生物关系还要近得多。我们还可以列举出一些海相生物的类似事例。

当我们谈到地球表面生物的分布时，第二个感到惊奇的就是障碍物。只要是能够妨碍生物自由迁徙的障碍物，就会对各个地区生物的差异产生重要影响。从欧洲和美洲的陆相生物性状的巨大差异中，我们可以看出这一点。不过还存在例外，两大洲北部的陆地几乎连成一片，气候也仅仅是略有差别，北温带生物可以自由迁徙，就像现存的北极生物一样。澳洲、非洲和南美洲的生物，情况也十分相似，虽然处于同一纬度，却具有极大的差异，因为这三个地区之间的隔离程度是世界之最。

在每一个大陆上都有同样的情况：在连绵的山脉、大沙漠甚至是大河两边，我们都可以找到不同的生物。显然，山脉、沙漠等障碍不像海洋隔离大陆那样难以跨越，也比海洋的存在时间短，因此同一大陆生物之间的差异，远比不同大陆生物间的差异小。

海洋也存在与陆地相同的情况，也有同样的规律。在南美洲东西两岸，除了极少数贝类、甲壳类和棘皮动物是两岸共有之外，其余海相生物都有着很大的差别。但是京特博士最近指出，在巴拿马地峡两边的生物，约有30%是相同的，这个事实使得许多博物学家相信，这个地峡以前曾是连通的海洋。美洲海岸的西边是一望无际的太平洋，这也是一种障碍物，没有可供迁徙的生物歇脚的岛屿。一旦越过太平洋，我们就会遇到与美国西部海岸截然不同的动物群。因此，共有三种不同的海相动物群系（一种是南美洲东岸大西洋动物群，一种是南美洲西岸太平洋动物群，还有一种是太平洋东部诸岛动物群），从南到北形成气候相似而彼此相距不远的平行线。可是，由于不可逾越的障碍物（大陆或是大洋）的阻隔，这三种动物群系几乎完全不同。与此相反，如果从太平洋热带部分的东部诸岛向西行进，不仅没有不可逾越的障碍物，还有无数岛屿可供歇脚，或是绕过半个地球直达非洲的连绵的海岸。在这广阔无垠的地带，不存在有着巨大差别的海相动物群。虽然在上述三种动物群系中，只有少数几种共有的海相动物，但是从太平洋到印度洋，有许多共有的鱼类，即使在几乎相反的子午线上——太平洋东部诸岛和非洲东部海岸，也存在许多共同的贝类。

第三个让人感到惊奇的大事就是，尽管物种类型因地而异，但同一大陆或同一海洋的生物之间都有亲缘关系。这是一条有无数实例可以证实的普遍规律。例如，当一位博物学家从北向南考察时，一定会对近缘且不同物种生物群的更替顺序而感到惊奇。他会听到不同种类的鸟发出几乎相同的鸣叫声，会看到鸟巢的构造虽然近似但绝不雷同，鸟卵的颜色也会近似而不相同。麦哲伦海峡附近的平原上生存着一种叫三趾鸵的美洲鸵属鸵鸟，而北面的拉普拉塔平原上则生活着同属的另一种鸵鸟。这两种鸵鸟与生活在同纬度的非洲、澳洲的真正的鸵鸟或鸸鹋都不一样。在拉普拉塔平原上，生活着啮齿目的刺鼠和绒鼠，它们的构造属于典型的美洲类型，它们的习性与欧洲的野兔和家兔差不多。在高高的科

迪勒拉山上，可以找到绒鼠的一个高山种。我们观察流水，只能发现南美型啮齿目的河鼠和水豚，而看不到海狸或者麝鼠。还有无数类似的例子，可以一一列举出来。如果我们考察一下远离美洲海岸的岛屿，不论它们的地质构造有多么不同，生物类型有多么独特，那里的生物都属于美洲型。正如在上一章中所讲的，那时在美洲大陆上和海洋里占据优势的物种都是美洲型。我们看到的种种事实与时间、空间、同一地区的海洋和陆地紧密地联系在一起，而与自然地理条件无关。对于这种联系的本质，博物学家肯定会追查到底。

其实，这种联系就是遗传。正如我们知道的，仅凭遗传一个因素，就足以形成彼此十分相似的生物或彼此相似的变种。不同地区生物之间的差异，主要是由变异和自然选择作用造成的，其次可能是自然地理条件的影响。决定不同地区生物变异的程度的因素有三个，一是过去很长时间内，生物的优势类型从一个地方迁徙到另一个地方时遇到的有效障碍；二是原先迁入者的数目和性质；三是生存竞争所引起的各种变异性质的保存情况。正如我们前面所说，生物与生物之间的关系是所有处于生存竞争的关系中最重要的。由于障碍物会妨碍生物进行迁移，于是它就起了特别重要的作用，这就像时间对于生物经过自然选择的缓慢变异过程而起着重要作用一样。凡是分布广的物种，打败了许多竞争者，个体数量也会很多。当它们扩张到新地区时，就有最好的机会夺取新地盘。当它们处于新的自然条件后，常常发生进一步的变异，然后再次获得胜利，并繁衍出成群的变异后代。根据这种遗传演化原理可以得知，为什么有些属的部分物种只会局限在某一地区，甚至整个属、整个科都是如此，而这也是普遍存在的情况。

上一章已经提到过，我们没有证据证明存在着某种生物演化必须遵循的规律。每一个物种的变异都有其独立性，只有当某种变异对每个个体都有益处时，才会在复杂的生存竞争中被自然选择利用，因此每个物种的变异程度是不一样的。如果有一些物种，在老地盘上彼此竞争已久，然后全体迁徙到一个新的地方，并与外界隔绝，那么它们出现变异的可能性很小，迁徙和隔绝对它们没有任何效果。这些因素只能在生物与新环境的关系较小时才会起作用，使生物之间建立起新的关系。正如我们上章所讲的，某些生物从远古时期以来就保持了几乎相同的性状特

征，经过迁徙后，某些物种的性状特征没有发生显著变化，甚至一点也没有改变。

依据这个观点，同属的物种必定起源于同一地点。虽然这些物种现在散布世界各地，但它们都来自一个共同的祖先。至于那些经历了整个地质时期却几乎没有变化的物种，它们肯定都是从同一地区迁徙来的。因为自远古以来的自然地理条件和气候发生了巨大变化，所以可能发生任何大规模的迁徙。不过我们有理由相信，在许多其他情况下，同一属的各个物种在很多情况下产生于较近的时期，这样一来，假如它们的分布地区相隔很远，就解释不通了。同理，虽然现在同一物种的每一个体分布在相隔遥远的地区，但它们一定来自其父母最初产生的地方。前面已经说过，不同物种的双亲难以产生同种的个体。

物种单一起源中心论

我们现在再来分析博物学家们曾研究过的一个问题，就是物种究竟是起源于地球表面的某一个地方还是多个地方。我们的确很难弄清楚同一物种是怎样从某一地点迁徙到现在所在的地方的，但是有一种最简单又最能令人信服的观点，即每一物种最初是在一个地点产生的。如果有人反对这个观点，也就会反对生物的世代繁衍和后代迁徙的事实，如此一来，不得不借助某种神奇的力量进行解释。在大多数情况下，一个物种生存的地方总是连在一起的，这是人们都承认的事实。如果某种植物或动物生存在相距甚远的两个地区，或者生存的两个地区之间隔着难以逾越的障碍物，那就是特殊情况了。陆相哺乳动物无法跨过大海迁徙，这一情况也许比其他任何生物更为明显，因此到目前为止，尚未发现同种哺乳动物分布在世界上相距遥远的两地。在英国和欧洲其他地区都有相同的四足兽类，没有一个地质学家觉得这个现象很难解释，因为最早英国和欧洲其他地区是连在一起的。然而，如果同一物种能出现在两个隔开的地方，那为什么在欧洲、澳洲及南美洲找不到一种共有的哺乳动物呢？这三大洲的自然条件很相似，有许多欧洲的动植物可以迁入美洲和澳洲并生存下来。而且，某些完全相同的原始植物生长在相距遥远的南北极附近。我认为之所以会出现这样的现象，是因为某些植物有很多传播方式，可以跨越广大的中间隔离地带进行迁徙，而这是哺乳动物无

法做到的。

只有当障碍物的一边产生很多物种而无法迁徙到另一边的时候，才可以清楚地了解各种障碍物的作用。少数科、亚科和属，以及属内的部分物种，都局限在一个地区内。根据几位博物学家的观察可知，凡是最天然的属或是物种关系最密切的属，它们大都分布在同一个区域，而且这些区域也必定是相连的。如果我们观察同一物种内的个体分布，它们最初若不是局限在某一个地方，而是受相反的分布法则支配，那可真是十分奇怪的事情了!

因此，我和其他许多博物学家的观点是一样的，认为每个物种最初只在一个单独的地方产生，然后再依靠迁徙和强大的生存能力，在许可的自然条件下，从最初的地方向外迁徙。对于一个物种如何从一个地方迁徙到另一个地方的，我们在很多情况下是无法解释的。但是，地理条件和气候条件在最近的地质时期肯定发生过变化，这就使得许多物种的分布区域从连续的分布区域变成不连续的。从而迫使我们考虑是否存在很多这种例外的情况，并且会使我们怀疑“物种最初产生于一个地方，其后尽可能地向外迁移”这个合理的信念。要想讨论所有同一物种分布在相距遥远而隔离的地区的情况，确实有点困难；况且，我们对于一些例子也难以解释。但是，我将讨论几个最显著的实例。首先，我们分析同一物种会分布在相隔遥远的山顶和南北两极的问题；第二，讨论淡水生物的分布范围（将在下一章讨论）；第三，关于同一个陆栖物种在大陆上和相距该大陆数百千米的海岛上同时存在的问题。由于我们对过去的气候和地理条件的变化以及生物的迁移方式等知之甚少，如果可以根据“物种从原产地向外迁徙”的观点来解释的话，那么“物种最初只有一个原产地”是比较可信的说法。

同时，即根据我的学说，从一个共同祖先传下来的同一属各物种，是否都是从某一个地区向外迁移，并且在迁移的过程中又同时发生了变异呢?这是我们需要考虑的问题。如果某一地区的大多数物种与另一地区的物种非常相似，却又不是完全相同时，假如我们能够证明在过去某一时期曾经发生过物种从一个地区迁移到另一地区的事情，那就会为“单一地点起源论”的观点提供证据，因为遗传演化学说可以明确地解释这一情况。例如，在距离大陆几百千米的海上形成了一个火山岛，经过很长

一段时间后，可能有少数物种从大陆迁移到火山岛上。由于遗传的原因，虽然这一部分物种的后代已经发生了变异，但是仍然和大陆上的物种有着亲缘关系。这种例子很多，而物种独立创生的理论是无法对此进行解释的，这个问题我们以后还会讨论。这一地区的物种和另一地区的物种有关系的观点，类似于华莱士先生的观点，他曾经断言：“每个物种的出现规律都应该和过去的相似物种在时间和空间上是一致的。”现在，我们非常清楚，华莱士先生认为是遗传演化造成了这种一致性。

物种形成于一个地方还是多个地方，这个问题与另一个类似问题是有区别的，而另一个类似问题就是：所有的同种个体是由一对配偶或一个雌雄同体的个体繁衍下来的，还是从同时创造出来的许多个体繁衍下来的呢?对于那些从不交合的生物（如果真的存在这种生物的话），每个物种一定是从连续变异的变种繁衍而来的。这些变种相互排斥，但绝不与同种的其他个体或变种个体相混合，因而在连续变异的每一个阶段，所有同一类型的个体必然是从同一个亲体传下来的。但是在大多数情况下，必须由雌雄两性交配或偶然杂交而产生新的后代，这样在同一地区、同一物种的每一个体，会因相互交配而几乎保持一致的性状。许多个体会同时变异，而且每一时期发生的所有变异不只是来自单一的亲体，例如英国的赛马和其他任何品种的马都不相同，但它的这种不同和优良性状并不只是来自一对父母亲体的遗传，而是世世代代对许多个体的选择和训练的结果。

上面提出的三个事实中，“物种单一起源中心论”可能是最难解释的问题。在分析它们之前，我们先来研究一下物种传播的方式。

生物传播的方式

莱伊尔爵士和其他学者已经对于物种的传播方式进行了很精辟的论述，我在这里只是简要地举出一些比较重要的事实。气候的变化对生物的迁移有重大的影响，就现在的气候条件而言，某一个地方对某些生物的迁徙是有害的，然而在从前某个时期也许是有利的。对于这一问题，我们将在下文中进行较仔细的讨论。

对于生物迁徙来说，陆地水平面的升降变化必定也会产生重大影

响。例如，如果两种海相动物群现在被一个狭窄的地峡隔离开来，一旦这条地峡被海水淹没了，两种海相动物群必然会混合在一起。现在是海洋的地方，过去可能是陆地，将大陆和海岛连接在一起，这样一来，陆相生物就可以从一个地方迁徙到另一个地方。在现代生物生存期间，陆地水平面曾发生过巨大的变化，没有一位地质学家对此有疑问。福布斯先生认为，大西洋的所有海岛近期内肯定曾和欧洲或非洲相联结。同样，欧洲也曾与美洲相联结。其他学者更是纷纷假定过去各个大洋之间都有陆路可通，而且几乎各个海岛也都与大陆相连。如果福布斯的论点可信，那就必须承认，几乎没有一个海岛在近期内不和大陆相联结。这种观点可以解释为什么同一物种会分布在相隔遥远的地方。但就我推测，现代物种存在期间不会发生如此巨大的地理变迁。我的意见是，虽然有大量证据表明海陆的变化极大，但并没有证据表明各个大陆的位置和范围会有这么巨大的变迁，以至于使大陆与大陆相连、大陆与海岛相连。的确，曾有过去供动植物迁徙时可以歇脚的岛屿，如今已经沉没了。在有珊瑚形成的海洋里，就有这种下沉的海岛，上面有环形的珊瑚礁作为标志。人们将来总会认可“各物种是从单一起源地产生的”的规律，也会更确切地了解生物的传播方式。到那时，我们就可以推测过去大陆的范围了。然而我并不相信，现在完全分离的多数大陆在近代曾经相连接或是几乎相连接，并且还和许多现存的海岛相连接（板块构造和大陆漂移理论已证实，这种情况的确存在）。某些生物分布方面的事实都与福布斯及其追随者的观点相反，例如，许多大陆两侧的海相动物群都存在巨大的差异；某些陆地和海洋的第三纪生物与该处现存生物之间有着密切的关系；海岛上生存的哺乳动物与距离最近的大陆上的哺乳动物之间的相似程度，部分取决于二者之间海洋的深度等。除此之外，海岛上生物的特征及相对比例，也与海岛以前曾与大陆相连接的观点相矛盾。何况所有这些海岛几乎全由火山岩组成，也无法支持它们是由大陆沉没后残留物组成的观点。假如它们原来是大陆的山脉，那么，至少应该有一些海岛是由花岗岩、变质岩、古代含化石的岩石等组成，而不仅仅是由火山物质堆积而成。

现在，我们必须解释一下“偶然”的含义，或者称为“偶然的传播方式”更为恰当些。在这里，我只讨论植物。经常在植物学相关的著作里发现这种情况，完全不了解这些植物通过海洋传播的难易程度，并提到不

适宜广泛传播的某种植物。在贝克莱先生帮助我做实验以前，我根本不知道植物种子对海水的侵蚀作用究竟有多大的抵抗力。我惊讶地发现，87种植物种子中竟有64种在盐水中浸泡28天之后仍能发芽，还有少数种子在盐水中浸泡137天之后仍能存活。值得注意的是，相对于别的目来说，有些目的种子更容易受到海水的侵蚀，例如我曾用九种豆科植物的种子做过试验，其中只有一种可以抵御海水的侵蚀，其余的都不能较好地抵御海水的侵蚀。与豆科近似的田基麻科和花葱科的七种植物种子，经过一个月盐水的浸泡后全部死掉了。为了方便起见，我选择不带荚和含有果实的小型种子做实验。浸泡数天后，它们就都沉到水底了，所以无论它们是否会受到海水的侵蚀，都不能漂浮着越过海洋。后来，我又试着用一些较大的有果实和带荚的种子进行实验，其中有些种子竟然在水面上漂浮了很长时间。众所周知，新鲜木材与干燥木材的浮力有很大差别，当洪水暴发的时候，常有带着果实或荚种的干燥植物或枝条被冲到大海里去。受这种想法的启发，我把94种带有成熟果实枝条的植物风干，然后放在海水里。结果，大部分枝条很快就沉入水底，但也有小部分植物，当它们的果实新鲜时，只能在水面上漂浮很短的时间，而在干燥后却能漂浮很长的时间。例如，成熟的榛子入水就会下沉，但是干燥后却可以在水面上漂浮90天，而且种在土里还能发芽。带有成熟浆果的天门冬，新鲜时能在海面上漂浮23天；风干后，在海水中漂浮了85天后仍然能够发芽。刚成熟的苦爹菜种子，浸泡两天后便沉入水底，但干燥后大约能漂浮90天，而且之后还可以发芽。在这94种干燥的植物中，有18种可以在海面上漂浮28天，其中包括可以漂浮更长时间的几种。在87种植物种子里面，有64种在海水里浸泡了28天之后还有发芽的能力。在和上述实验的物种不完全相同的另一组实验中，94种成熟果实的植物种子经干燥后，有18种可以在海水里漂浮28天以上。根据这些实验，我们可以推论：任何地区的植物种子，大约有14%能在海水中漂浮28天后仍保有发芽的能力。在约翰斯顿的著作《自然地理地图集》里，有几处标示着大西洋海流的平均速度是每昼夜53千米（33英里），有些海流的速度可高达每昼夜97千米（60英里）。根据海流的平均速度计算得知，某个地区的植物种子进入大海后，约有14%可漂过1487千米（924英里）的海面，到达另一个地区。在搁浅之后，如果吹向陆地的风，还可以把这些种子带到适宜的地点，并且发芽成长。

后来，马滕斯也做了相似的实验。他改进了实验的方法，将许多种子放到一个盒子里，然后投入真正的海洋里，使盒子里的种子有时浸到海水里，有时又暴露于空气中，就像真的在漂浮一样。马滕斯一共选了98类植物种子来做实验，他选用的多为大果实的和海边植物的种子，其中的大多数植物种类和我做实验时选用的不同，这样或许会延长植物种子在海水中的漂浮时间，而且这些种子对海水侵蚀的抵抗力也许更高。我们已经知道，干燥可以使某些植物漂浮的时间更长些，然而马滕斯并没有风干这些做实验的植物。马滕斯得到的实验结果是，在98类不同的植物种子里，有18种漂浮了42天后仍保有发芽的能力。然而，我毫不怀疑，在波浪中的植物所漂浮的时间，会比免受剧烈颠簸影响的种子漂浮的时间短。因此我们可以更加谨慎地假设：一个地区的植物，可有10%的类型的种子在干燥时能漂浮过1448千米（900英里）宽的海面，并且还能保有发芽的能力。有趣的是，大型果实往往比小型果实漂浮的时间更长。按德康多尔的说法，具有大型果实的植物，它们无法通过其他任何方法来传播，因此分布范围通常会受到限制。

有时候，植物的种子需要依靠别的方式进行传播。漂流的木材经常被波浪冲到海岛上，甚至会被冲到大洋中心的岛屿上。太平洋珊瑚岛上的土著居民，专门收集这种漂流植物的根部所挟带的石块，可以将其制作成贵重的皇家税品。我发现，当有些形状不规则的石块卡在树根中间时，小块泥土经常被挟带在石块和树根之间的缝隙里，将缝隙填充得非常严密，经过海上长途漂流后也不会被冲刷掉一丁点。曾有一棵生长了50年的橡树，其根部有完全密封的小块泥土，将这些泥土取出后，竟然有三棵双子叶的植物种子从中发出芽来，我确信这个观察是可靠的。我还可以说明，有些时候，漂浮在海上的鸟类尸体没有立刻被别的动物吃掉，这些死鸟的嗉囊里可能有许多类型植物的种子，长期保持着发芽的活力。例如，将豌豆和巢菜的种子在海水里浸泡几天后就会死掉，但是如果让它们被鸽子吞食到嗉囊里，再把死鸽放入人工海水中浸泡30天，然后取出嗉囊里的种子，这些种子几乎全部都能够发芽。

有许多事实可以证明多种鸟类被大风吹带着飞越远洋，因此鸟类是传播种子最有成效的动物。在这种情况下，我们可以谨慎地猜测鸟的飞行速度大约是每小时56千米（35英里）。还有的学者认为速度会更快一

些。我从来没有看到过，营养丰富的种子能够通过鸟的肠子排出，但是那些有硬壳的种子甚至能够在通过火鸡的消化器官后依然完好无损。在我的花园里，我两个月内曾从小鸟的粪便里捡出12类植物种子，它们从表面上看来都是完好的。我试着将其中一些种子进行播种，都还能发芽。更重要的是，正像我实验的那样，鸟的嗉囊不能分泌消化液，丝毫不会使种子的发芽能力受到伤害。我们可以肯定的是，鸟类在找到并吞食了大量食物之后的几小时甚至18小时内，这些食物尚未全部进入嗉囊，而在这段时间，鸟类可以很容易地顺风飞行到805千米（500英里）以外的地方。我们都知道，老鹰会捕食飞倦的鸟类，当老鹰撕开所捕食的鸟类的嗉囊，里面所存的种子就会轻易被散布出去。有的老鹰会把捕获的猎物整个吞下，经过10～20小时后，再吐出小团食物残渣。根据研究发现，这小团残渣内含有能发芽的种子。燕麦、小麦、粟、加那利草、大麻、三叶草及甜菜的种子，在不同食肉鸟的胃里停留12～21小时后都能够发芽。甚至有两粒甜菜的种子，在胃里停留了2天又14小时后还能发芽生长。我发现，淡水鱼类可以吞食多种陆生和水生植物的种子，而鱼又经常被鸟吃掉，因而植物的种子就可以从一个地方传播到另一个地方。我曾经把各种植物种子装到死鱼的胃里，再用鱼喂食鱼鹰、鹳和鹈鹕等鸟类，好几个小时后，种子会作为小团残渣被鸟类从嘴里吐出来或是跟着粪便排泄出来。这些被鸟排出的种子里，有一些还具有发芽的能力，但也有一些经过鸟类的消化过程而死亡了。

有时候，飞蝗将会被风吹到离大陆很远的地方。我曾在非洲海岸595千米（370英里）外的地方捉到一只飞蝗，还有人在更远的地方也捉到过。罗夫牧师告诉莱伊尔爵士，在1844年11月，马德拉岛上空飞来大群飞蝗，就像暴风雪一样遮天蔽日，数目众多的蝗群一直延伸到要用望远镜才能看到的高处。在两三天的时间里，蝗群一圈又一圈地飞着，渐渐形成一个直径至少有八九千米（五六英里）的巨大的球形，在夜晚时降落，将树木全部遮住了。后来，蝗群突然在海上消失了，再也没有出现过。现在，非洲南部纳塔尔地区的一些农民仍然相信，大群的飞蝗常常飞到那里，这些飞蝗排泄的粪便中有植物的种子，从而导致有害的植物传播到他们的牧场上。韦尔先生认为这种情况是真实的，曾给我随信寄来了一小包蝗虫的干粪便，我在显微镜下检查出几粒种子，将它们播种后长出了七棵草，属于两个物种两个属。因此，突然飞袭马德拉岛的

蝗虫群很可能是一种植物种子的传播方式，它们的种子可以轻易地被传播到远离大陆的海岛上去。

虽然鸟类的喙和爪常常是干净的，但有时难免沾上泥土。有一次，我从一只鹧鸪的脚上取下4.0克（61喱）重的干黏土；还有一次，我取下了1.4克（22喱），并从中找到一块碎石块，像巢菜种子一样大小。更有意思的是，一位朋友曾给我寄来一条丘鹬的腿，胫部粘着一块0.6克（9喱）重的干土，干土里面包着一粒蛙灯心草的种子。我将种子播种后，它发了芽，开了花。四十年来，居住在布来顿地区的斯惠司兰先生一直专心观察英国的候鸟，他对我说，他常常在鹡鸰、穗和欧洲石等鸟类初到英国海滨尚未着陆之前，就把它们打下来。他有很多次都看到鸟的爪上粘有小块泥土。这种含有种子的小泥块很常见，有许多事实可以证明。例如，牛顿教授曾寄给我一条受伤无法飞翔的红足石鸡的腿，上面粘着一团泥土，重约185克（6.5盎司）；这块泥土曾保存了三年，后来把它打碎放在玻璃罩内，加水后竟然从土里长出了82棵植物，其中有12棵单子叶植物（包括普通的燕麦草和一种以上的茅草）、70棵双子叶植物，从这些双子叶植物的嫩叶形状来判断，至少有三个不同的品种。每年会有许多鸟类随大风远涉重洋，例如飞越地中海的几百万只鹌鹑，它们会把偶然粘在喙和爪上泥土中的几粒种子传播出去。我们对这些事实还能有什么疑虑吗？我还会在后文中讨论这个问题。

冰川偶尔挟带着泥土、石头，甚至是树枝、骸骨和陆栖鸟类的巢等。正如莱伊尔所说的，在南北极地区，植物的种子偶尔会被冰川从一个地方运到另一个地方。而在冰河时代，即便是现代的温带地区，也会有冰川把种子从一个地方运到另一个地方。相比其他大西洋上更靠近欧洲大陆的岛屿，亚速尔群岛上的植物与欧洲大陆植物的共同性更高。用华生先生的话来说，就是： 按照纬度进行比较，亚速尔群岛的植物，表现出较多北方植物的特征。据我推测，亚速尔群岛上部分植物的种子是在冰河时期由冰川带去的。我曾请莱伊尔爵士写信给哈通先生，询问他在亚速尔群岛上是否看到过漂石，哈通先生回答说，曾见到该群岛原本没有的花岗岩和其他岩石的巨大碎块。因此我们推测，以前的冰川把所负载的岩石带到这个大洋中心的群岛上时，也把少数北方植物的种子带了过来。

一年又一年，上述传播方式不断地发挥作用，几万年之后，如果许多植物的种子没有被广泛地传播出去，那倒真成了怪事!人们有时认为这些传播方式是偶然的，这是不妥当的观点；洋流方向不是偶然的，定期信风的风向也不是偶然的。人们应该能够发现，任何一种传播方式都很难将种子散布到极远的地方，种子在海水的长期作用下会失去发芽的活力，而且也不能在鸟类嗉囊或肠道里停留过长的时间。但是，这些传播方式无法使种子从一个大陆传播到距离极远的另一个大陆，尽管它们已经足以使种子跨越几百千米宽的海洋，或者从一个海岛传播到另一个海岛，或者从一个大陆传播到附近的海岛。距离极远的大陆上的植物群将会各自保持着独立的状态，不会因为这些传播而混合在一起。从海流的方向可知，种子不会从北美洲传播到英国，但却可以从西印度传播到英国的西海岸，只是那种子即使没有因长期被海水浸泡而死去，也不一定能够适应欧洲的气候。几乎每年都会有一两只陆鸟从北美洲乘风越过大西洋，来到爱尔兰或英格兰的西部海岸。但它们只可以通过一种极其偶然的方式传播种子，即将种子黏附在喙上或爪上的泥土中。在这种情况下，要想使种子落在适宜的土地上生长至成熟，又是多么困难的事情啊!但是，如果在最近几百年里，像大不列颠那样生物繁盛的岛没有因偶然的传播方式从欧洲大陆或其他大陆迁来植物（此事难以证明），因而就认为那些缺乏生物的贫瘠海岛离大陆更远，也不能用类似方式迁入移居的植物，那就大错特错了。如果有100种植物种子或动物迁移到一个海岛上，尽管这个岛上的生物远远不如不列颠的繁盛且仅有一个物种能够适应新家园、可被驯化，但是在悠久的地质时期，如果那个海岛正在上升，岛上没有繁多的生物，对这种偶然的传播方式的效果仍不能毫无根据地予以否认。一个荒凉的岛上几乎不会有害虫或鸟类，只要有适宜的气候，每一粒偶然落到这里的种子就有可能发芽并生存下来。

冰期时的传播

在一些被数百千米宽的低地分隔开的高山顶上，生长着许多完全相同的植物和动物。因为高山物种是无法在低地生存的，所以我们很难理解，为什么在相距较远而隔离的地方能发现相同的物种，而且我们也没有关于物种能够从一个地方迁徙到另一个地方的生动事例。在阿尔卑斯山和比利牛斯山的积雪地带以及欧洲最北面的地区，同时生存着许多相

同的植物，这很值得我们注意。而美国怀特山上的植物和拉布拉多的植物完全相同，正如阿沙格雷所说，这些植物又和欧洲最高山顶上的植物几乎完全相同，这就更值得我们仔细研究了。早在1747年，葛美伦曾就同样的事实断言，同一物种可以在许多相距遥远的不同地方分别创生出来。如果阿加西斯和其他学者不提醒人们注意冰河时代的生物分布，我们可能仍然保持着过去的观点。正如我们立刻就会看到的，冰河时期可以给这些事实一个简明的解释。我们有各种可靠的证据可以证实，在最近的地质时期，欧洲中部和北美洲都曾处于北极型气候下。观察苏格兰和威尔士的山岳，从它们山腰的冰川划痕、光滑的表面和摆放在高处的漂石可以看出，在最近的地质时期里，山谷曾充满了冰川。这些痕迹比着火后房屋的废墟更清楚地表明，以前欧洲的气候变化非常剧烈，意大利北部古冰川所遗留下的巨大冰碛石，如今长满了葡萄和玉米。在美国的大部分地区都能看到冰川漂石和有划痕的岩石，这些迹象清楚地表明那里以前曾有一个无比寒冷的时期。

根据福布斯的解释，以前的冰期气候对欧洲生物的分布可能会产生以下影响：假设有一个新冰期正缓慢到来，接着又像以前的冰期那样渐渐过去，这样我们就更容易体会到它们的各种变化。当严寒来临时，处于南方各地区的气候变得适宜北方生物的生存，于是北方生物必然向南迁移，占据以前温带生物的位置。与此同时，除非被障碍物阻拦而死亡，温带生物也会一步步向南迁移。高山将被冰雪覆盖，原来的高山生物将向山下迁移到平原地区。当严寒达到极点时，北极地区的动物群遍布欧洲中部，并一直向南延伸到阿尔卑斯山及比利牛斯山，甚至是西班牙。现在的美国温带地区，在当时也同样遍布北极型的动物和植物，而且和欧洲的动植物种类基本相同。因为上面我们假设北极圈里的生物要向南迁移，所以不论在地球的哪个地方，生物类型都是相同的。

当气候逐渐回暖时，北极型生物可能要向北退却，接着温带生物也会北移。当积雪开始从山脚下慢慢融化时，北极型生物便占据了这个解冻的空旷地带。随着温度慢慢增高，融雪向山上移动，北极型生物也渐渐移到高山上，与它们同类型的一部分生物则逐渐向北退去。因此，当温度完全恢复正常时，原先曾在北美及欧洲平原的北极型同种生物，其中的一部分回到欧洲和北美洲的北部寒冷地区，另一些则留在相距甚远

而又隔离的高山顶上了。

由此，我们就可以明白，为什么会有那么多的相同植物出现在北美和欧洲的高山等相距遥远的地区。我们还可以明白，为什么每个山脉的高山植物，和它们正北方或近似正北方的植物有着更特殊的密切关系，生物迁移的路线受气候的影响通常是正南或正北的。例如华生先生所说的苏格兰的高山植物，以及雷蒙德先生所说的比利牛斯山的植物和斯堪的纳维亚北部的植物特别相似；美国和拉布拉多的高山植物类似；西伯利亚高山上的植物和俄国北极区的植物相似。这些观点都是以过去确实存在的冰期为依据的。因此我认为，过去存在冰期这一事实能非常圆满地解释现代欧洲和美洲的高山植物及北极型植物的分布情况。就算没有别的证据，当我们在其他地区相距很远的山顶上找到同种生物时，也可以断定这里曾有过寒冷的气候，使这些生物迁徙时通过高山之间的低地，但现在这些低地的温度变得太高，不适宜寒冷植物生存了。

由于北极型生物开始向南迁移和后来的向北退回都是随着气候的变化进行的，因此在它们长途迁徙的过程中并没有遇到温度的剧烈变化；又因为这些生物是集体进行迁徙的，致使它们之间的相互关系也没什么大的变动。所以，按照本书反复论证的原理，这些类型不会发生较大的变异。然而，高山植物在温度回升的时候就相互隔离了，开始是在山脚下，最后留在山顶上，并不是所有同种的北极型生物都能遗留在各个相距甚远的山顶上且长期生存下去，因此具体情况也会有些差别。况且还有一些古老高山物种，在冰期以前就生存在山顶上，在冰期最严寒时暂时被驱逐到平原上来，它们可能与新遗留的北极型物种相混合，同时也会受到各山脉之间稍有不同的气候的影响。因此，这些遗留下的物种之间，相互关系多多少少会受到影响，很容易产生变异。事实上，它们的确发生了变异：如果对比欧洲几大山脉现今存在的所有高山动物和植物可以看到，虽然还有许多相同的物种，可是有些成为变种，有些成为可疑的物种或亚种，还有些成为近缘而不同的物种，构成了各个山脉特有的代表物种。

在上文的讲述中，我曾假定在这种设想的冰期刚开始时，环绕北极地区的北极型生物是和现在我们所见到的一致。不过我们还得假定，当初地球上的亚北极和少数温带生物也是相同的，因为现在生存在较低山

坡和北美洲、欧洲平原上的物种，其中也有一部分是相同的。可能有人要问，在真正大冰期开始的时候，应该怎样解释全世界亚北极生物和温带生物相同的程度呢?如今，整个大西洋和北太平洋把美洲和欧洲亚北极带和温带的生物隔开了。在冰期中，这两个大陆生物的栖息地在如今栖息地的南方，彼此之间肯定被更广阔的大洋所隔开。如此一来，人们会疑惑：在冰期或冰期之前，同一物种是怎样进入这两个大陆的呢?我相信，问题的关键在于冰期开始之前的气候特征。在晚上新世时期，地球上的生物种类大多数与现在相同，可以确信的是，和现在相比，当时的气候更温暖。因此我们可以假定，现在生活在北纬60°以南的生物，当时却生活在更靠近北极圈的66°至67°之间；而现在的北极生物，在上新世时则生活在十分靠近北极点的陆地上。如果我们仔细观察地球仪可以发现，在北极圈内，从欧洲西部穿过西伯利亚直至美洲东部，陆地几乎是连在一起的。由于这种环形陆地的连续性，生物可以在适宜的气候下自由迁徙。于是，就可以解释欧洲和美洲亚北极生物和温带生物在冰期之前是相同的假设了。

上述种种理由使我们相信，各个大陆的相对位置几乎长期没有任何变化，尽管海平面有巨大的上下波动。我引申这一观点，以便推论更早更温暖时期的情况。例如，在古老的上新世，有大量相同的植物和动物出现在几乎连续的环极陆地上；临近冰期到来之前，随着气候逐渐变冷，无论是在欧洲还是在美洲生存的动植物就开始慢慢地向南迁移。正如我所认为的那样，我们现在在欧洲中部和美国所看见的动植物后代多数已经发生了变异。根据这种观点，就可以理解为什么北美洲与欧洲的生物很少是完全相同的了。如果考虑到这两个大陆相隔甚远，又被整个大西洋隔开，那么这种关系就格外引人注意了。我们对于上述几个观察家所提出的另一个奇特事实，即欧美两大洲晚第三纪，生物之间的关系比现在更为密切，也就有了更深的理解，其原因是在晚第三纪较温暖的时期，欧美两大洲的北部陆地几乎连在一起，方便了两洲的生物迁徙，后来因为严寒降临，该处才不能通行了。

当上新世温度渐渐降低后，在欧洲和美洲生存的相同物种很快都从北极圈向南方迁徙，如此一来，两大洲的生物之间便断绝了联系。在两大洲较温暖地区的生物的这种隔离，必定在很久以前就发生了。这些北

极动植物向南迁移，在美洲必然会与美洲土著动植物混合而产生生存竞争；在欧洲也发生了相同的事情。因此，一切情况都有利于它们产生大量的变异，其程度远非高山生物可比。高山生物只是被隔离在欧洲和美洲的高山顶上和北极地区，而且时代也近得多。所以，如果将欧洲和美洲两个大陆的现代温带生物进行比较，我们只能从中找到少数相同的物种。（尽管阿沙格雷近期指出，两洲相同种类的植物比我们以前估计的要多。）但是我们发现，每一个纲里都有很多类型在分类上引起争执，并被不同的博物学家要么列为地理亚种，要么干脆列为不同的物种。当然，博物学家们也认为许多非常相近或具代表性的类型是不同的物种。

海水中的情况和陆地上一样，在上新世甚至更早的时期，海洋生物几乎都是沿着北极圈内连续的海岸慢慢向南迁移，按照变异的学说，我们可以解释为什么完全隔离的海洋里会生存着很多非常相似的生物类型。我们同样也可以解释，为什么在北美洲东西两岸的温带地区，灭绝生物和现存生物之间的关系如此密切。我们甚至还可以解释一些更奇怪的事情，例如地中海和日本海的许多甲壳类（如达纳的著作中所描述的）、鱼类及其他海相动物，它们之间都有密切的关系，而现在地中海和日本海已经被整个亚洲大陆和宽广的海洋隔开了。

对于那些物种之间有密切相似关系的事实——现在和以前在北美洲东西两岸海洋里的生物、地中海和日本海中的生物、北美和欧洲温带陆栖生物间的密切相似关系等，都无法用创造学说来解释。我们不认为就因为这些地区的自然地理条件相似，就一定能创造出相似的物种。如果我们把南美洲的某些地区和南非洲或者澳洲的某些地区进行对比就可以发现，在自然地理条件相似的地区也生存着颇不相同的生物。

南北冰期的交替

现在，我们来讨论一个更直接的问题。我确信福布斯的观点可以被广泛应用。在欧洲，我们从不列颠西海岸到乌拉尔山脉，南至比利牛斯山，都能见到以前冰期留下的显著证据。从冰冻的哺乳动物和山上植物的性状，我们可以推断西伯利亚也曾受到类似的影响。胡克博士在观察后发现，黎巴嫩山脉的中脊曾经被永久性的积雪覆盖。它所形成的冰川从122米（400英尺）的高度直泻至山谷。最近，胡克在非洲北部的阿特

拉斯山脉低地发现了冰川遗留下的大堆冰碛物。沿着喜马拉雅山，在相距1448千米（900英里）远的地方，发现了冰川以前下泻的痕迹。在锡金，胡克博士还看到古代留下来的巨大冰碛物上长着玉米。从亚洲大陆向南，直到赤道的另一边，根据哈斯特博士和赫克托博士的研究，我们知道新西兰以前也有过冰川流到低地的情况。胡克博士在这个岛上也发现，相距甚远的山上长着相同的植物，说明这里曾有过寒冷时期。克拉克牧师曾写信告诉我一些事实，从中可以看出澳洲东南角的山上可能也有以前冰川活动的痕迹。

我们再来看看美洲：在北美洲东侧向南直到纬度36°至37°的地方，以及北美洲西侧，从现在气候差别很大的太平洋沿岸起向南直到纬度46°的地方，都发现了冰川带来的冰碛物；在落基山上也曾见到漂石。南美洲的科迪勒拉山几乎位于赤道上，冰川曾在很长一段时间内远远地伸展到目前的雪线以下。而在智利中部，我曾调查过一个由岩石碎块（内含大砾石）堆成的大山丘，这个大山丘横在保地罗山谷里。可以确信的是，那里曾一度形成过巨大的冰碛堆积。福布斯先生告诉过我，他曾经在位于南纬13°至30°之间的科迪勒拉山（高度约12000英尺，合3658米）上，发现了有很深擦痕的岩石和含有带凹痕小砾石的大碎石堆，与挪威的很相似。在整个科迪勒拉山地区，即使是最高处，现在也没有真正的冰川了。沿着这个科迪勒拉山地区两侧再向南，即从南纬41°到大陆的最南端，我们可以看到无数从很远的地方漂过来的巨大漂石，那是很明显的以前冰川活动的证据。

基于下列事实：冰川作用曾遍布南北两个半球；从地质意义上来说，两半球的冰期都属于近代；从冰期所引起的效果来看，南北半球的冰期持续时间都很长；在近代，冰川曾沿科迪勒拉山的走向向下延伸至低地平面——我曾做出这样的结论：全球的温度曾在冰期同时降低。现在，克罗尔先生在一系列著作里试图说明，冰河气候是由各种物理原因造成的，而这些物理原因是地球轨道离心率增加而引起的。所有原因都导致了一个相同的后果——冰期形成，而其中最主要的原因则是地球轨道的离心率对海流的间接影响。按照克罗尔先生的说法，冰期每隔一万年或一万五千年就会有规律地循环发生一次。在长久的间冰期之后，由于某种偶然事件，这种严寒会极端严酷。而在这些偶然事件中，最重要

的就是海陆的相对位置变化。克罗尔先生认为，最近一次冰期发生在24万年前，持续了大约16万年，气候在这段时期没有发生大的变化。几个地质学家则根据直接证据推测，在中新世和始新世也曾有过冰期。至于更久远的古老的冰期，就不用提了。克罗尔所得出的结论中，最重要的一点就是：当北半球经历冰期时，海流方向的改变导致南半球的温度升高了，冬季也变得温暖了。反过来，当南半球经历冰期时，北半球的情况也是如此。我认为，这个结论对说明冰期生物的地理分布极为重要。不过，在此我先列举几个需要解释的事例。

胡克博士曾经指出，南美洲火地岛的开花植物（在当地贫乏的植物中占据很大一部分）中，除了许多相似的物种外，还有四五十个物种和北美洲、欧洲的完全相同。众所周知的是，这几个地方处于地球相反的两个半球，彼此之间的距离遥远。在美洲赤道地区的高山上，生存着大量属于欧洲属的独特物种。在巴西奥更山的植物中，加得纳发现了少数欧洲温带属、某些南极属和某些安第斯山的属，它们都是山脉之间低凹热带地区所没有的植物。而在加拉加斯的西拉，洪堡先生发现了科迪勒拉山特有属的一些物种。非洲的阿比西尼亚山上，也生长着几种欧洲特有的类型和少数好望角植物的代表类型。好望角也有少量欧洲物种，可以相信是非人为引入的，而且在山上也有一些不是非洲热带地区的欧洲代表类型。胡克博士也指出，在几内亚湾内的费尔南多波岛高地和相邻的喀麦隆山上，有几种植物与阿比西尼亚山上和欧洲温带植物有着十分密切的关系。胡克还说，罗夫牧师在佛得角群岛上找到了几种相同的温带植物。相同的温带类型几乎沿着赤道横穿整个非洲大陆，一直延伸到弗得角群岛上，这些事实是自有植物分布记录以来最令人吃惊的了。

在喜马拉雅山和印度半岛各个隔离的山脉上，在锡兰（现称斯里兰卡）高地以及爪哇的火山顶等地方，有很多完全相同的植物。某一地方的植物既是那一地方的代表种类，同时又是欧洲植物的代表类型，即各山脉之间低凹炎热地区所没有的植物。在爪哇高山上所采集的各属植物的名单，竟好像是欧洲丘陵上所采集植物名单的复制品。更让人惊奇的是，有些婆罗洲（又名加里曼丹）山顶上生长的植物竟然代表了澳洲的特有类型。我听胡克博士说，这些澳洲植物有的沿马六甲半岛高地向外延伸，其中一些零散地分布于印度，另一些则向北延伸到日本。

米勒博士曾在澳洲南部的山上发现过一些欧洲物种，在低地上也发现了一些非人为引入的其他类型的欧洲物种。胡克博士告诉我，在澳洲发现的欧洲植物的属有很多，而它们都是两大洲之间的热带地区所没有的植物。在《新西兰植物导论》一书中，胡克列举了一些类似的奇特事实。因此我们可以看到，和南北温带平原上的植物相对，热带地区高山上生长着的某些植物，要么属于同一物种，要么是同一物种的变种。然而按照华生所说的，“从北极向赤道地区迁移时，高山或山地植物群的北极特征实际上变得越来越少了”，可以得知，这些植物并不是真正的北极类型。除了这些完全相同或非常类似的类型外，还有很多现在中间热带低地没有的植物属生长在这些相距甚远的地区。

上述结论仅就植物而言，但是陆相动物方面也存在少量类似事实。海相生物也是如此。最高权威达纳教授曾说过：“新西兰的甲壳动物和大不列颠的非常相似，而这两地在地球上的位置正好相反，这一事实的确令人感到惊奇。”理查森爵士也说，在新西兰和塔斯马尼亚岛的海岸边发现过北方的鱼类。胡克博士还说，在新西兰，有25种海藻和欧洲是相同的，但在这两个地方的中间热带海洋里却没有这些藻类。

按照上述事实可知，温带型生物生存于以下地方：横穿非洲的整个赤道地区，沿着印度半岛一直延伸到锡兰和马来群岛；此外，还穿过了南美洲广阔的热带地区，等等。由此可见，有相当数量的温带类型生物曾在冰河期达到鼎盛的时候迁移到赤道地区的各个低地。在那个时期，赤道地区海平面上的气候可能和现在同纬度五六千英尺（注：1英尺≈0.3米）高的地方一样，或许更冷些。在气候最严寒的时期，赤道地区的低地上遍布混杂丛生的热带植物和温带植物。这种情形就像胡克所描述的现代喜马拉雅山四五千英尺高的低山坡上混生的植物一样，只是温带类型可能更多一些。与此相同的是，曼先生在几内亚湾的费尔南多波海岛的山上发现，大约在1524米（5000英尺）高的地方，欧洲温带类型植物开始出现。在巴拿马610米（2000英尺）高的山上，西曼博士就发现了和墨西哥类似的植物，“热带型植物与温带型植物协调地混合着”。

我们现在再来看一下克罗尔先生的结论： 当北半球遭遇大冰期时，南半球却是暖和的。就现在无法解释的南北半球温带地区和热带高山地

区植物的分布而言，这个结论给了某种清楚的解释。如果按照年代计算，冰期必然极长久。但是当我们回忆起在几百年内，有些动植物在驯化后又扩散到广大的地区时，那么对于任何数量生物的迁移过程来说，冰期的时间都是足够的。当气候越来越寒冷的时候，北极型生物便侵入了温带地区。根据上述事实，某些较健壮的、具有优势、分布又广的温带生物必定会侵入赤道地区的低地，而由于当时南半球是比较温暖的，热带低地生物必然同时向南方的热带及亚热带地区迁移。当冰期即将结束的时候，南北半球会慢慢恢复原来的温度，那么生活在赤道低地的北温带生物要么被驱逐回原来的家乡，要么趋于灭亡并被由南方返回的赤道类型生物所代替。然而，肯定有一些北温带生物在撤退时登上了某些邻近的高原。如果这些高原有足够的高度，它们就会像欧洲山顶上的北极类型一样，永久地生存在那里。即便是气候不完全适宜，它们也能继续生存，因为温度的升高肯定是很缓慢的，而植物对于气候也有一定的适应能力，它们会把这种抵抗冷和热的不同的能力遗传给后代，就证明了这一点。

按照事物的普遍发展规律可知，当南半球经历冰期时，北半球会变得温暖一些，于是南温带生物就会迁移到赤道低地地区。这时，以前生活在高山上的北方类型也会向山下迁移，和南方类型混合在一起。等到温度回升，南方类型必然会回到家乡，但是也会有少数物种留在高山上，而且与某些从山上迁移下来的北温带类型一起返回南方。因此，会有一些完全一样的极少数物种，生存在南北温带地区和中间热带地区的高山上。然而，这些长期留在山上或另一半球的物种处在与家乡有着细微差异的自然环境中，必须和许多新类型竞争。因此，这些物种非常容易发生变异，以至它们以变种或代表种的形式存在，事实也是如此。我们要明白的是，南北半球都曾经历过冰期。只有这样，才能用相同的原理来解释，为什么中间热带地区没有的、彼此又不大相同的许多物种，会生存在自然条件相同而又相距甚远的南北半球温带地区。

有一个值得注意的事实，那就是胡克和德康多尔分别对美洲和澳洲的生物进行研究后，一致认为，物种（不论相同的还是稍有变异的）从北向南迁移时的数量要比从南向北迁移的多。不过，在婆罗洲和阿比西尼亚山上，我们还是看到了少数南方类型生物。我据此推测，由于北方

陆地的范围比较广、北方类型在北大陆生存的数量较多，于是从北向南迁移的物种更多；由此产生的结果就是，在自然选择和生存竞争的影响下，北方类型比南方类型的进化程度更高、更完善，占据更大的优势。因此，南北两大类型生物会在南北冰期交替时在赤道地区相会。北方类型较强，不仅能够保住它们在山上的地盘，还能和南方类型一起向南迁移；南方类型则没有足够强大的力量对付北方类型。现在，情况依然没有变化，拉普拉塔和新西兰的地面生长着许多欧洲生物，澳洲也有同样的情况（程度稍微弱一点），当地土著生物遭到了欧洲生物的排挤。从另一方面来说，近两三百年来，虽然有大量的容易黏附种子的皮革羊毛及其他物品从拉普拉它运往欧洲，但是在近四五十年来，从澳洲运往欧洲的也有很多，然而仅有极少数的南方类型能在北半球的某个地方被成功驯化。但是，却出现了例外的情况。胡克博士说，印度的尼尔吉利山上的澳洲类型繁殖得很快，已经被成功驯化了。显而易见的是，最后的大冰期到来之前，热带高山上生长着土著高山类型植物，但是后来，占有更大优势的北方植物排挤了这些高山类型。许多海岛上土著植物的数量和入侵植物相近，或许更少些，这意味着它们已经走上了趋向灭亡的第一阶段。山岳是陆地上的岛屿，山上的土著生物逐渐被北方广大地区繁衍的生物所替代，就像真正海岛上的土著生物向北方入侵生物让出自己的地盘，并将继续向人类驯化而来的大陆型生物让出自己的地盘一样。

生活在北温带、南温带和热带山上的陆相动物和海相生物也是如此。在冰期最严酷时，洋流方向与现在不同，有些温带海洋生物可以到达赤道地区，其中可能有少数生物能够沿着寒流继续向南迁移，剩下的则留在较冷的深海里，一直等到南半球经历冰期时，它们才会继续前进。正如福布斯所说，这种情况和现在的北极生物仍生存在北温带海洋深处是一样的。

虽然我们并不清楚，现在相距遥远的南方、北方、中间高山上生活的同一物种和近缘物种，在其分布状况和亲缘关系的问题，但都可以用上述观点简要解释。我们还没有弄清楚它们迁徙的具体路线，也不明白为什么有些物种迁徙了而另一些却没有迁徙；为什么有些物种发生了变异并形成了新类型，而其他物种却没有任何变化。对于这些事实，我们

无法给出合理的解答，除非可以解释下面的问题：为什么某一物种可以在异地被人类驯化而其他物种不能?为什么某个物种的分布范围会比本地另一物种的分布范围大两三倍，数量也多两三倍？

目前还有很多问题尚待解决。如胡克博士所指出的，在克尔格伦岛、新西兰和弗吉尼亚这些相距遥远的地方，同种植物都能生存。不过，根据莱伊尔的观点，这些植物的分布也许和冰山有关系。更值得我们注意的是，有一些不同种却完全相同的南方属生物，生存在南半球的这些地方和其他遥远的地方。这些物种之间有着很大的差异，以至于人们怀疑它们自最后一次大冰期开始后是否有足够的时间迁徙并发生某种程度的变异。这些事实似乎说明，同一属的各个物种是从一个中心点逐渐向外迁移的。我认为，南北半球都曾经在最后冰期到来之前有过一个温暖的时期。现在被冰雪覆盖着的南极大陆，在当时会有一个和外界隔绝的特殊植物群系。我们可以假设，当最后一次冰期还没有灭绝这个植物群之前，少数类型已经借助偶然的传播方法，经过当时尚未沉没的岛屿，向着南半球的各个地方广泛地传播，因此美洲、澳洲和新西兰南岸等地都出现了这种特殊类型的生物。

莱伊尔曾在一篇文章里，就全球气候变化对生物地理分布的影响表达了和我几乎相同的观点。现在，我们再一次强调克罗尔先生的结论：一个半球上发生冰期时，另一半球恰好是温暖时期。将这个结论和物种缓慢演变的观点相结合，就可以对相同或相似的生物散布全球的事实做出解释。在一段时期，携带着生物的洋流从北向南流；而在另一时期，又从南向北流，但都曾流过赤道地区。可是，从北向南的洋流的力量比由南向北流的更大，以至于可以在南方自由扩散。由于洋流把它携带的漂浮生物沿着水平面搁浅遗留在各个地方，而且洋流水面越高，遗留的地点也越高，于是携带生物的洋流从北极低地到赤道高地，将漂浮的生物沿着一条缓慢上升的线遗留在热带的山顶上。这些遗留下来的生物，与人类尚未开化的民族相似，被驱逐退让到各个深山险地，成为以前土著居民生活在周围低地的一项很有说服力的证据。

第十三章：生物的地理分布（续）

淡水生物的分布

由于陆地的阻碍，湖泊和河流系统彼此分隔，于是人们可能认为淡水生物无法在某个地区广泛分布。又因为海洋是更难逾越的障碍物，所以人们又以为淡水生物似乎永远也不能扩展到遥远的地方去。其实，事实正好相反。某些不同纲的淡水物种分布十分广泛，而且近缘物种遍布全球。当我第一次在巴西淡水中采集标本时，看到那里的淡水昆虫、贝类等和不列颠的十分相似，而周围陆地上的生物却与不列颠的十分不同，这令我感到十分惊奇。

我认为在大多数情况下，淡水生物广泛分布的能力可以这样解释：它们以一种对自己极为有利的方式逐渐适应了不停从一个池塘到另一个池塘，或是从一条河流到另一条河流的短距离迁移。毫无疑问，淡水生物凭借短距离迁移的能力，必然能将地理分布扩展到十分广泛的范围。在此，我们列举几个例子。我们曾经以为，在相距遥远的两个大陆上绝不会存在同一种淡水鱼。可是最近，京特博士指出： 在塔斯马尼亚、新西兰、马尔维纳斯群岛和南美洲大陆上，都栖息着同一种鱼类——南乳鱼。这个例子极为特别，表明在以前某个温暖的时期，这种鱼可能从南极的中心向周围各个地区扩散。不过，南乳鱼属里的物种，也许会以某种我们未知的方式，渡过宽广的海洋。因此从某种程度上来说，京特的例子也不算太稀奇。这一属内还有一个物种，生存在相距约370千米（230英里）的新西兰和奥克兰群岛上。淡水鱼类的分布在同一个大陆上经常是广泛而又毫无规律可循的，因为在两条相邻的河流中，有些物种相同，而另一些则完全不同。

在偶尔的情况下，淡水鱼类也会以我们意想不到的方式传播。例如，淡水鱼会被旋风卷起，吹送到很远的地方后仍能存活；大家都知道的是，即使经过相当长的时间，从水里取出来的鱼卵也能保持活力。然而，淡水鱼分布很广的原因主要还在于近期内地平面的升降变化，使得

各河流可以相互沟通。而当洪水暴发的时候，虽然地平面没有变化，但是各河流却可以彼此沟通。从古至今，山脉两侧河流的汇合被众多连绵的山脉阻碍了，导致河流里的鱼类差异很大，由此得出的结论与上述是一致的。有些淡水鱼类是很古老的类型，在这种情况下，它们长期经历着缓慢的地理变迁，有足够的时间利用各种方式进行大规模的迁移。此外，京特博士经过一些研究后得出结论，鱼类是可以长期保持同一种类型的。海水鱼类经过处理后，逐渐就可以适应并习惯淡水生活。根据瓦伦西奈的说法，几乎没有一个类群的鱼是全部只生活在淡水里的。因此，属于淡水鱼类群里的海水种，可以很容易地沿着海岸向很远的地方游到远处的河流中，然后再次适应淡水生活。

有一些种类的淡水贝分布得十分广泛，其近缘物种也遍布全球。根据我们的理论可知，从一个共同祖先传衍下来的物种肯定有着单一的发源地。起初，我对近缘物种如此广泛的分布感到十分疑惑，因为它们的卵不像是由鸟类传播的，而且卵遇到海水时会立刻死亡，这种情况和成本是一样的。我甚至也想不明白，为什么某些被驯化的物种可以在同一地区迅速传播呢？然而，有两个事实（肯定还会发现许多其他的事实）会对解答这个问题有所启发。我曾经两次看到，鸭子从布满浮萍的池塘里突然浮出来时，背上都粘着浮萍；还有一件事情，当我把一个水族箱里的浮萍移到另一个水族箱里时，无意中将贝类也挟带着移了过去。不过，另一种媒介的效果或许更好一点：我把一只鸭子的脚挂到水族箱里，箱里正有许多淡水贝类的卵在孵化，我发现许多极微小的、刚孵出的贝类会爬上鸭脚，并且牢固地黏附着，以至于我把鸭脚拿出水面，这些贝类也不会脱落（它们再长大一些时，自己就会脱落）。虽然这些刚孵出来的软体动物的本性是水生，但当它们黏附在鸭脚上，暴露在潮湿的空气中时，还可以存活12～20小时；在这段时间里，一只鸭子或鹭鸶至少可以飞行六七百英里（注：1英里≈1.6千米）。要是遇到顺风，还能飞过海洋，到达某个海岛或是其他某个遥远的地方，然后降落在池塘里或小河里。莱伊尔告诉我，他曾经捉住过一只龙虱，在这只龙虱身上黏附着一只盾螺（一种淡水贝类）；他还在“贝格尔”号船上看到了同科水甲虫的另一物种细纹龙虱，当时船离最近的陆地72千米（45英里）；如果遇到顺风，恐怕没有人能断定这龙虱可以被吹到多么遥远的地方去。

我们早已知道，无论是在大陆上还是在海岛上，许多淡水植物和沼泽植物的种类都分布得十分广泛。按照德康多尔的说法，那些大的陆生植物物种群里含有极少数水生物种，而这些水生物种的分布范围广得令人惊讶。我想，对于这个现象，可以用水生物种有效的传播方式来解释。我在前文里提过，鸟类的脚和喙有时会沾上少量的泥土。如果经常徘徊在池塘岸边污泥里的涉禽类突然受惊起飞，它们的爪子上常常会沾着泥土。相比其他类型的鸟，涉禽目里的鸟漫游的范围更广，它们有时也会飞往大洋中最遥远荒凉的海岛。当然，它们不会降落在海面上，不会让脚上的泥土被海水冲洗掉。而等到它们到达陆地之后，一定会飞到经常出没的淡水栖息地。植物学家很难预测池塘里的泥土中含有多少植物种子，我曾做了几个小实验，其中一个最典型的例子就是：二月份，我在一个小池塘水下三处不同的地方取了三汤匙泥土，这些泥土干燥后，重量仅有191克（6.75盎司）。接着，我用带盖的容器装好这些泥土，并将容器放置在书房里六个月。每当从泥土中长出一棵植物，我就把它拔掉并统计数字，一共长出了537棵植物，而它们属于很多不同的类型。事实上，这块泥土用一只早餐用的杯子就可以盛下了。这告诉我们，假如水鸟没有把淡水植物的种子传播到远方，或许就没有长满植物的小池塘和小溪流了。此外，淡水中某些小动物的卵，也可利用同样的水鸟媒介进行传播。

或许，还有其他媒介物也起过传播的作用。我说过，淡水鱼可以吞食某些植物的种子（尽管有的种子被吞下后又被吐了出来），甚至小型鱼也可以吞食很大的种子，例如黄睡莲和眼子菜等。鹭鸶和其他的鸟类不断地捕食鱼类，食用后就飞到其他的河湖池塘，或是顺风飞越海面。我们已经知道，在若干小时后，种子将被鸟类当作废物吐出来或随着粪便排泄出来，但仍然保持着发芽的能力。当我看到莲花的种子很大，又想起德康多尔关于它分布情况的叙述时，便觉得莲花种子的传播方式让人难以理解。但是奥杜邦说，他曾经在鹭鸶的胃里发现了南方莲花的种子（胡克博士猜测，可能是大型北美黄睡莲）。这种鹭鸶一定常常在胃里装满了莲子，然后又飞到远处其他池塘里再捕食鱼类。通过类似的推断，我相信，适宜发芽的种子会随着粪便被鹭鸶排泄出来。

讨论上述几种传播方式时，我们应该注意的是：当某个池塘或者小

溪刚形成的时候，里面肯定没有生物，在那时，每粒种子或每个卵都将有很好的成功机会。就算同一池塘里生存的生物种类再少，相互间也会有某种生存斗争。不过，即便池塘里的生物非常繁盛，和相同面积陆地上生存的陆栖生物相比较，物种的数量还是要少一些。因此，池塘里物种间的竞争没有陆栖物种间的竞争残酷。由此产生的结果是，一种外来入侵的水生生物会比陆地上的移居者有更好的机会获得新的地盘。我们还应该明白的是，在自然系统的分类上，许多淡水生物的地位是较低下的。所以我们有理由相信，这些生物的变异要比高等生物缓慢一些，这就使得水生生物拥有更多的迁徙时间。我们也不要忘记这样一种可能性：许多淡水类型原来曾分布在连续的广大区域，后来分布在中间地区的生物却灭绝了。然而，不论是保持原有类型，还是发生了某种程度的变异，对于广泛分布的淡水植物和低等动物来说，它们都主要依靠动物，尤其是具有强大飞翔能力的淡水鸟类将它们的种子和卵从这一片水域传播到另一片水域。

海岛上的生物

我在前文中说过，不仅同一物种的所有个体起源于同一个地方，就连目前在彼此相隔甚远的地点生存的相似物种，也是由同一个发源地向外迁徙发展而来的。我按照这一观点，曾选择出有关生物分布最难解释的三类事实（前章已讨论过两类）。现在，我们来讨论最后一类事实。我已经列举出了很多理由，来说明我不相信陆地的范围曾在现存物种期间有过极大的扩展，而使几个大洋中的岛屿都连成大陆，并形成现代陆相生物。尽管这个观点可以消除许多解释上的困难，但它却不符合有关岛屿生物的真相。在下文的论述中，我将不仅仅分析生物的分布问题，还将讨论生物的特创论和遗传变异进化论二者孰是孰非的问题。

相比大陆上同样面积上生存的生物，生存在海岛上的生物种类要少得多。德康多尔认为植物的情况是这样的，沃拉斯顿认为昆虫的情况也是如此。例如，新西兰有高耸的山脉，有各种各样的地形，南北长达1255千米（780英里），其外围诸岛有奥克兰、坎贝尔和查塔姆等，但是所有的显花植物加起来才960种；如果我们把这个数字和澳洲西南部或好望角相等面积上种类繁多的生物数量相比较，则一定会承认：存在

某种与自然条件无关的因素，使得两地物种的数目出现如此巨大的差异。在地势平坦的剑桥郡，生存着847种显花植物，而小小的安格尔西岛上也有764种，不过这两个数字中也包含少数蕨类植物和其他地方引入植物的种类。就其他方面而言，这种比较并不十分公平。有证据表明，阿森松（位于非洲西面的大西洋上）这个贫瘠的荒岛原先只有6种显花植物，而现在已有很多迁入物种被驯化了，就像新西兰和其他海岛的情况一样。我们有理由相信，在圣海伦娜岛，外来驯化了的植物和动物已经把许多土著生物灭绝了或几乎灭绝了。信奉特创论的人不得不承认，许多适应性最强的动植物并不是海岛上原来就有的，而是人类无意中带到海岛上的。在这方面，人类的能力远远超过了大自然。

尽管海岛上物种的数目不多，但是本地的特有种类所占比例往往很高。例如，我们把马德拉岛上特有的陆栖贝类和加拉帕戈斯群岛上特有的鸟类数目，与任何大陆上特有的贝类或岛类进行比较，然后再把岛屿的面积与大陆面积比较时，就可以知道这是真的。这种事实在理论上也是可以被预料的，因为就像前文说过的，物种进入一个新的环境中，必然会和那里的土著生物进行竞争，极容易发生变异并形成成群的变异了的后代。然而，我们绝不能因为某个纲的物种差不多都是岛上特有的，就认为其他纲的物种或同纲的其他物种也必然是特有的。之所以会出现这种差异性，一部分原因是许多未变异的物种曾是集体迁入该地区的，它们之间的自然关系没有发生什么变化；另一部分原因则是没有变异的物种经常从原产地迁入该地，并和岛上生物进行了杂交。我们要明白的是，这种杂交形成的后代肯定非常强壮，其偶然的杂交产生的后果常常超出人们预料之外。对此，我要举出几个例子来说明一下：在加拉帕戈斯群岛上，生存着26种陆栖鸟类，其中有21种（或23种）是岛上特有的；但是在11种海鸟中，却只有2种是特有的。显然，出现这种现象是因为海鸟比陆鸟更容易也更频繁地飞到海岛上来。另一方面，百慕大群岛与北美洲大陆之间的距离，与加拉帕戈斯群岛和南美洲大陆之间的距离差不多，而且百慕大群岛上的土壤十分特殊，但岛上却没有特有的陆鸟。根据琼斯先生关于百慕大群岛精彩的描述可知，很多北美洲的鸟类会不时地飞到这个群岛上。哈考特先生告诉我，几乎每年都有一些鸟从欧洲或非洲被风吹到马德拉群岛上，这个岛上一共有99种鸟，但仅有一种是特有的，它和欧洲的一种鸟类似；此外，有三四种鸟是马德拉群岛

和加那利群岛所特有的。因此，许多鸟从相邻的大陆飞来百慕大和马德拉两个群岛，并且长期进行着竞争，已经相互适应了。它们定居在新家乡以后，还会彼此牵制，使每一物种都保持自己固有的习惯和在自然界中的位置，这样就不容易发生变异。除此之外，在原产地（大陆）没有发生变异的原种频繁地迁入该岛，与先来者进行杂交，这也阻止了变异的产生。马德拉群岛有数量庞大的特有陆栖贝类，却没有一种海栖贝类是特有的。尽管目前我们尚不清楚是怎样传播的，但是我们知道的是，海栖贝类的卵和幼体可以附着在海草、漂浮的木头或涉禽的脚上，从而越过五六百千米（三四百英里）的海洋。在这方面，海栖贝类要比陆栖贝类容易得多。生存在马德拉群岛上的各目昆虫也有相似的情况。

有时候，海岛上会缺少某些纲的动物。它们在自然界的位置被其他纲动物占领了。这样，加拉帕戈斯群岛上的爬行类和新西兰的巨型无翅鸟都代替或曾经代替了哺乳动物的位置。虽然这里仍将新西兰当作海岛来讨论，但是这样的划分在某种程度上是有疑问的，因为新西兰的面积很大，而且没有很深的海将它与澳洲分隔开。根据新西兰的地质特点和山脉走向，克拉克牧师主张新西兰和新喀里多尼亚岛都应该归属于澳大利亚。针对植物方面，胡克博士曾说，加拉帕戈斯群岛的各目植物的比例，与别的地方的差异十分显著。这种数量上的差别和某些整群动植物的缺失，通常是以海岛上自然条件不同来解释的，但这种解释的正确性却十分令人怀疑。生物迁入岛上的难易程度，应该和环境条件的性质是一样重要的。

对于海岛上的生物，还有很多方面需要注意。例如，有的海岛上没有一只哺乳动物，可是本岛特有的植物却长着奇特的带钩种子。钩最明显的用途是可以使种子挂在哺乳动物的毛或毛皮上，从而得以传播出去。因此，这种有钩的植物种子可能是通过某种方法带到岛上来的，其后经过变异成为本岛特有的物种，但保留了它们的小钩。就像许多岛上昆虫已经愈合的翅鞘下仍有退化翅膀的突起，这钩已经毫无用处。另外，海岛上经常长着许多乔木和灌木，而和它们同目的植物在其他地方只有草本物种。根据德康多尔的解释，不管出于什么原因，木本植物的分布范围常常是受到限制的。树木很难传播到遥远的海岛上，而草本植物也很难在和生长在陆地上的许多发育完全的树木的竞争中取胜。一旦

草本植物定居在海岛上，就会越长越高，超过其他草本植物。在这种情况下，自然选择的倾向就是增加植物的高度。因此，不论植物是哪一个目，都有可能变成灌木，然后演化为乔木。

海岛上没有两栖类和陆栖哺乳类

很早以前，文森特先生就报道过海岛上没有整个动物目的情况。大洋里的岛屿虽然很多，但从未在这些岛屿上发现蛙、蟾蜍、蝾螈等两栖类。我曾经费尽精力去验证此说法的真伪，发现除了新西兰、新喀里多尼亚、安达曼群岛，或许还有所罗门群岛和塞舌耳群岛之外，这种说法是正确的。但我对于新西兰和新喀里多尼亚是否应该列为海岛，还是抱有疑问，至于安达曼、所罗门群岛及塞舌尔群岛是否应该列为海岛，就更难确定了。这么多真正的海岛上都没有蛙、蟾蜍及蝾螈，绝不是能用海岛的自然条件就可以解释的。很明显的是，海岛特别适宜蛙、蟾蜍及蝾螈这些动物生存，因为蛙曾经被引入马德拉、亚速尔和毛里求斯等岛，它们在那里大量繁殖，甚至泛滥成灾。但是，蛙和它的卵一碰到海水马上就会死亡（现在已知有一个印度种是例外），当然也就难以越过海洋传播，由此我们可以知道，为什么它们在真正的海岛上不能存在。然而，要问它们为什么不在海岛上被创造出来，特创论的观点就很难解释这一问题了。

哺乳类提供了另一个类似的情况。我曾认真查阅了最早的航海记录，没有找到一个实例可以证明陆栖哺乳动物（土著人饲养的家畜除外）曾在远离大陆的海岛上生存，即便是在离大陆比较近的海岛上也一样。只在马尔维纳斯群岛上，生存着一种像狼的狐狸。这似乎是个例外。不过，马尔维纳斯群岛不能作为海岛看待，因为它位于一个和大陆相接的沙堤上，离大陆仅451千米（280英里），冰山曾把漂石带到它的西海岸，可能在那时把狐狸也顺便带了过去，就像现在北极地区常常发生的事情一样。我们不能认为小海岛连小型哺乳动物也养活不了，因在很多小型哺乳动物就生存在靠近大陆的小岛上。我们几乎说不出有哪一个小岛，小型哺乳动物不能在那里被驯化并滋生繁衍。按照特创论的观点，应该有足够的时间使得哺乳动物产生并生存下来。事实上，许多火山岛非常古老，它们经历的巨大侵蚀作用和第三纪地层便可证明，这些

岛有足够的时间形成本地特有的其他纲物种。而在大陆，哺乳动物新种的出现和灭绝，要比其他低等动物快。尽管海岛上没有陆栖哺乳动物，但飞行的哺乳类却到处都是。新西兰有欧美其他地方都没有的蝙蝠；诺福克岛、维提群岛、小笠原群岛、加罗林和马利亚纳群岛及毛里求斯岛，各自都有特殊类型的蝙蝠。也许人们会问，为什么在这些遥远的海岛上只产生蝙蝠而不产生其他的哺乳动物呢？我认为这个问题的答案很简单：因为没有陆栖哺乳类能够越过广阔的海洋，而蝙蝠可以飞越。曾经有人在大白天看到蝙蝠远远地飞行在大西洋上空。在距离大陆966千米（600英里）的百慕大群岛，也偶尔会出现北美洲的两种蝙蝠。专门研究蝙蝠的专家汤姆斯先生告诉我，许多种类的蝙蝠的分布范围非常广泛，在大陆和遥远的海岛上都能找到它们的踪影。因此，我们只要推想这类到处迁移的物种在新家乡由于它们在自然界中的新位置而发生变异，就会理解为什么海岛上没有其他哺乳动物，而只有本地特有的蝙蝠。

还有一种有趣的关系，即各个海岛或是海岛与最邻近的大陆之间所隔海水的深浅程度，与哺乳动物亲缘关系的疏密程度有一定的联系。埃尔先生曾对此问题做过深入的观察，后来又被华莱士先生在庞大的马来群岛所做的卓越研究加以扩充：马来群岛和相邻的西里伯斯群岛被一片深海相隔，两边群岛上的哺乳动物有着十分显著的差别，但每一边的海岛周围都是相当浅的海底沙滩，岛上生存着相同或非常相似的哺乳动物。虽然我还没有时间在世界各地去研究这类问题，但是据我所知，这种关系是正确的。例如，不列颠与欧洲中间仅隔着浅海峡，两边的哺乳动物是相同的；澳洲海岸附近所有岛屿上的情况也是一样。与这种情况相反的是，在西印度群岛深达约1800米（1000英寻）的沙洲上，我们找到了许多美洲类型生物，然而它们的属和种却很不相同。动物发生的变异量与时间的长短有关，而且浅海相隔的岛屿或与大陆分隔的岛屿比那些深海隔开的岛屿更容易连在一起。所以我们可以知道，两个地区哺乳动物的亲缘程度和隔开它们的海水深度有一定关系。然而，特创论学说则无法解释这些问题。

以上是关于海岛生物的叙述，即物种的总数目很少，而本地特有类型占比较大；同一纲里，有的类群会产生变异，而有的类群却不会变

异；有些目，例如两栖类和哺乳类全部缺失，尽管存在能飞翔的蝙蝠；有些目的植物出现特殊的比例；草本类型的植物发展成为乔木，等等。我认为，相比所有海岛在以前与最近的大陆相连的观点，长期以偶然方式传播的观点更符合实际情况。因为按后一种观点，可能不同纲的生物会一起迁入海岛，且因为是物种集体迁入，物种间相互关系没有多大变动，结果它们要么保持不变，要么所有的物种都以相同的方式发生变异。

不可否认，在关于遥远海岛上的许多生物（不管它们仍然是原来的物种，还是发生了变异，）怎样来到它们现在栖息的地方的问题上，还存在着许多重大的难点。但是，绝不能忽视这样的可能性，即以前可能有其他岛屿做过生物迁徙时的歇脚点，如今却没有留下任何痕迹。有一个难以解释的情况值得分析：几乎所有的海岛，甚至完全孤立、面积很小的岛上，都生存着陆栖贝类。这些贝一般是本地特有物种，少数是和其他地方共有的物种。古尔德博士曾列举了太平洋岛屿上的例子。我们都知道，陆栖贝类很容易被海水杀死。它们的卵，起码是我实验过的那些卵，一遇到海水就会下沉而死亡。但是，必定还会有某些未知的、偶然有效的方式将它们传播开来。刚刚孵化出来的幼体，会不会黏附在地面上栖息的鸟儿的脚上进行传播呢？我想到陆地贝类冬眠时壳口上盖着膜罩，可以黏附于木头的缝隙中漂过宽阔的海湾。我发现几种贝类于休眠状态下浸泡在海水中7天，依然活着。一种罗马蜗牛经过这样的处置后，等到它再次休眠时，又将浸泡在海水中20天，依然能够完全恢复。在这么长的时间里，按照海流平均速度计算可知，这种蜗牛可以漂浮1062千米（660英里）远的距离。这类蜗牛壳口长着厚厚的石灰质口盖。我把一个蜗牛原来的口盖除掉，待新的口盖形成后，又将它浸泡到海水里14天，它还是复活了，而且可以慢慢爬行。后来，奥甲必登男爵也做了类似的实验：他将分别属于10个种类的100个陆栖贝类放到扎了许多小孔的盒子里，在海水中浸泡两个星期；等到取出后，100个贝中有27个依然活着。看来，口盖的有无十分重要。圆口螺因为有口盖，12个螺中有11个复活了。值得注意的是，我在实验中用的那种罗马蜗牛可以很好地抗御海水侵蚀，而奥甲必登用另外四种罗马蜗牛的54个个体做实验，结果没有一个活着。不过，陆栖贝类绝不可能经常采用这种方式进行传播，更为普遍的方式可能是利用鸟类的脚来传播。

海岛生物与邻近大陆生物的关系以及生物从最近的起源地向海岛迁居及其后的演变

依我们来看，最生动最重要的事实莫过于海岛上的物种与邻近大陆上的物种亲缘关系相近但又不完全相同。此类例子很多，不胜枚举。加拉帕戈斯群岛位于赤道，离南美洲海岸805~966千米（500~600英里），在那里，几乎每一种水生和陆栖生物都有着十分明显的美洲大陆烙印。这个群岛上一共有26种陆栖鸟类，其中21种或23种和大陆的鸟种是不一样的，过去一般认为它们是在群岛上被创造出来的。但是，群岛上的大多数鸟类，在习性、姿态、鸣叫的音调等许多基本特性上，又都显现得与美洲物种十分密切。其他动物也是如此。在胡克博士有关该群岛的著作《植物志》中，也描述了很多植物这种相似而又不完全相同的现象。博物学家站在这些离大陆几百千米的太平洋火山岛上，观察周围的生物，似乎自己身处美洲大陆。为什么会这样呢？为什么以为是在加拉帕戈斯群岛而不是其他地方创造出来的物种，竟然如此清楚地显示出和美洲物种十分密切的亲缘关系呢？加拉帕戈斯群岛在生存条件、岛上地质特征、岛的高度和气候以及共同生活的各纲生物比例方面，没有一个条件和南美洲沿岸类似，事实上，一切条件都与南美洲大不相同。另一方面，加拉帕戈斯群岛在土壤的火山性质、气候、高度和岛的大小等方面，和弗得角群岛在相当程度上是相近的，然而这两个群岛上的生物却完全不一样。弗得角群岛生物和非洲生物的关系，也正如加拉帕戈斯群岛生物和美洲生物的关系一样。对于这种事实，按照特创论的观点是根本解释不通的。而与此相反的是，根据本书提出的观点来看，显然加拉帕戈斯群岛可能接受了从美洲迁移来的生物，不管是由于偶然传播的方式还是由于以前相连的大陆的原因（我对此学说持怀疑态度），而弗得角群岛则接纳了从非洲迁移来的生物。这些迁入的生物虽然容易发生变异，但是通过遗传因素，仍旧可以发现它们原产地的秘密。

还有许多类似的实例可以证明一个普遍的规律，海岛上特有的生物和最邻近大陆上或者最邻近大岛上的生物几乎是相关联的。只有少数情况例外，但是这些例外也可以给出合理的解释。例如，胡克博士曾在报告中指出，克尔格伦岛离非洲的距离近但离美洲远，可是该岛上的植物不但和美洲物种有亲缘关系，而且关系十分密切。如果我们认为岛上的

植物主要是随着冰山带来的种子及泥土、石块等海流定期漂来的话，这种例外就可以得到解释。新西兰的土著植物和最邻近的澳洲大陆植物的关系，要比和其他地区植物的关系密切得多，这也许是我们可以预料的事实。虽然南美洲是新西兰第二个邻近的大陆，可两者的距离十分遥远，然而，新西兰的土著植物和南美洲植物也有关系，因此这一事实也就成了例外。但是，如果依照下面的观点，部分难点就解决了：在比较温暖的第三纪和最后一次大冰期开始之前，新西兰、南美洲和其他南方地区的部分生物，是从位于它们中间的、遥远的、当时长满植物的南极诸岛迁移而来的。更值得注意的事实是，澳洲西南角的植物群和好望角的植物群之间亲缘关系疏远，但只有植物方面如此，这种情况将来总会解释清楚的。

决定海岛生物和最邻近大陆生物之间亲缘关系的规律，有时也适用于范围较小的同一群岛，只是这种情况更加有趣：在加拉帕戈斯群岛中，每一个孤立的岛屿上都有许多互不相同的物种。由于各岛屿之间的距离很近，必然会接受同一原产地物种的迁入，也必然会有各岛物种之间的相互迁入，因此人们可以预料的是，各岛物种间的关系比它们与美洲大陆或其他任何地方物种的关系更加密切。这些独立又彼此相望的海岛，具有相同的地质特征、相同的海拔高度和气候，可是为什么迁入的许多物种会产生不同的变异呢？这个问题很棘手，我一直不得其解，主要原因是束缚于一个根深蒂固的错误观点，即认为一个地区的自然条件是至关重要的。然而，不可否认的是，每个物种都会和其他物种进行生存竞争，因此对于这一物种能否成功地生存下来，竞争对手（即其他物种）的性质和自然条件是同等重要的，甚至更重要一些。再观察一下加拉帕戈斯群岛与世界其他地方共同拥有的物种，我们就会发现，几个岛上的同一物种有相当显著的区别。如果海岛上的生物是由偶然方式传播而来的，例如一种植物的种子传到这个岛上，而另一种植物的种子传到另一个岛上，尽管这些种子都是从同一个原产地传播出来的，但是物种在不同岛屿上的分布差别也是显而易见的。因此，一个物种先传播到某一个海岛上，之后又从此岛传播到另一个海岛上，必然会遭遇不同的自然条件，也势必要和不同的生物进行竞争。例如，某种植物在各岛上找到最适合自己生存的地方，而这个地方已被各岛上不同的物种占领了，那么这种植物就会遭到不同竞争对手的排挤。在这种情况下，如果这个

物种发生了变异，自然选择就可能使不同海岛出现不同的变种。不管情况如何，有些物种仍然可以向外岛传播而保持相同的性状，就像我们在大陆上所见到的分布很广而保持相同性状的物种一样。

在加拉帕戈斯群岛及其他类似例子中，最使人感到诧异的是，每个新物种在岛上形成后，并不会快速地传播到其他岛屿上。虽然这些海岛可以彼此相望，但是中间被深海湾所隔开，多数海湾比不列颠海峡还要宽，于是我们也没有理由认为这些海岛在以前曾是连在一起的。各海岛之间的海流湍急汹涌，而且很少刮大风，所以它们相互之间的隔离程度比地图上所显示的实际距离还要大。尽管如此，也有一些物种是很多岛屿共有的，包括群岛特有物种和与世界其他地区的共有物种。根据现在物种分布的状态推测，物种最初是从一个岛上传播到其他岛上的。不过，我们往往错误地认为，非常相近的物种在自由往来时可能会相互侵占对方的地盘。显然，如果一个物种对于另一物种来说更具有某种优势，那么它将在很短的时间内把对方排挤掉。但是如果两个物种都能够很好地适应各自生存的地方 （岛屿），那么在相当长的时期内，它们将在分离的岛屿上各自保持自己的地盘。我们都很清楚的是，经过人类的驯化后，许多物种能十分迅速地在广大地区传播开来。这让我们很容易推想到，大多数物种都是这样传播的。但是，我们应该记住，那些在新地区被驯化的物种通常和当地土著物种不太一样，甚至可以说是差别显著。就像德康多尔说的，大部分情况下是不同属的物种。在加拉帕戈斯群岛，许多鸟类甚至可以非常方便地从一个海岛飞往另一个海岛，但实际上各个岛的鸟是有区别的。例如，有三种近缘关系的效舌鸫（又叫应声画眉鸟），每一种的分布都局限在自己的本岛上。现在，我们假设查塔姆岛上的效舌鸫被大风吹到了查尔斯岛上，而查尔斯岛已经有自己特有的效舌鸫，绝不会容忍外岛的效舌鸫在自己岛上定居。我们可以稳妥地推断：查尔斯岛上的效舌鸫已经饱和，每年所产的卵和孵出的幼鸟超出了该岛的养育能力。我们还可以推测，就适应能力而言，查尔斯岛上特有的效舌鸫不会比外来查塔姆岛上的特有种差。关于这类问题，莱伊尔爵士和沃拉斯顿先生曾告诉我，有许多陆栖贝类的代表物种生存在马德拉群岛和相邻小岛圣港，其中有些物种生活在石缝里，尽管每年都会有大量石块从圣港运送到马德拉群岛，但是并没有圣港的贝类迁移到马德拉群岛来。然而，欧洲陆栖贝类的移入者可以在圣港和马德拉群岛上

繁衍，由此可见，相对于本地物种，这些欧洲贝类更具有某种优势。根据这些研究可知，加拉帕戈斯群岛某些岛屿上的特有物种不会从一个岛上传播到另一个岛上，我们不必对此感到奇怪。此外，在同一大陆上，根据“先入为主”的惯例，相似的地理条件对于不同地区物种的混入可能有十分重要的作用。因此，澳洲东南地区和西南地区具有相似的自然地理条件，中间又有连续的陆地，但是两个地区的许多哺乳类、鸟类和植物却不相同。贝茨先生认为，生存在亚马孙河谷的蝶类和其他动物也存在这种现象。

上述控制海岛生物基本面貌的法则，即移居生物和它们最容易迁出的原产地的关系以及生物迁到新地区后发生变异的法则，在自然界具有普遍性。在每一个山顶上、湖泊及沼泽里，我们都可以发现这个法则在发挥作用。对于高山物种而言，除了那些在大冰期内已经广泛分布的物种之外，其他物种都和周围低地物种关系密切，例如南美洲的高山蜂鸟、高山啮齿类和高山植物等，所有物种都属于美洲类型。当一座山脉慢慢隆起时，许多生物就会从周围低地迁过来。湖泊和沼泽里的生物也是如此，除了那些由于传播方便而能广泛分布在世界各地的类型以外。这一法则同样适用于欧洲和美洲洞穴里大多数瞎眼动物的分布特征。我认为下列情况是真的：无论两个地区之间的距离多么遥远，只要存在许多近缘物种或代表种，就必定会存在相同的物种。并且，无论什么地方，只要有许多近缘物种存在，就必定有许多在分类上有争议的类型：一些博物学家认为它们是不同物种，另一些博物学家则认为它们是变种。这些有疑问的类型代表了物种在变异过程中的不同阶段。

某些亲缘关系十分密切的物种，可以分布在世界上相距十分遥远的地区，这正好表明现存物种或过去物种具有较强的迁移能力和较广阔的迁徙范围。这种因果对应关系也能从下面这些例子体现出来：例如，古尔德先生曾告诉过我，如果有些鸟属是世界性的，那么其中许多物种必然是广泛分布的。尽管这条规律难以确证，但我不怀疑它的正确性。在哺乳类中，蝙蝠的分布明显符合这条规律；猫科和犬科的情况大体上符合这一规律；蝴蝶和甲虫的分布也同样如此。许多淡水生物的分布也是如此，因为各个纲中有许多属遍布全世界，其中许多物种有广大的分布范围。然而，这并不意味着所有物种的分布范围都是很广泛的，而是指

其中一部分物种分布范围广；这也并不意味着这些属里的所有物种具有相同的广泛性，这多半要看变异的程度。例如，在美洲和欧洲分别生存着同一物种的两个变种，那么这个物种就有广泛的分布范围；但是，如果变异继续进行，这两个变种就可以成为不同物种，而它们的分布范围则会因此缩小。这也不意味着凡是有越过障碍物的能力而向远处分布的物种就必然分布得很广，就像某些有强壮翅膀的鸟类，因为我们永远不能忘记：分布广泛不仅是指具备越过障碍物的能力，还指具有在遥远地方与当地土著生物进行生存斗争时取得胜利的能力。即使一切同属物种在世界上相距最遥远的地方分布着，但都是从一个祖先传下来的。按照这个观点，我们可以在这个属里找到某些分布很广泛的物种。

其实每个纲中都有起源非常古老的属，在这种情况下，有充足的时间让物种向外扩散并发生变异。就地质方面的证据而言，我们有理由相信，各个纲里的较低等生物，其变异速度比高等生物更缓慢一些。由此产生的结果是，前者有较多的机会向远处扩散并保持同一物种的特性。将这个事实和大多数低等生物的种子及卵都很微小且更容易远程传播的事实结合起来，就能说明一个定律，那就是“生物的等级越低，分布得越广泛”。最近，德康多尔先生就植物的分布也讨论了这条定律。

综上所述：低等生物比高等生物的分布得更广；在分布广泛的属内，某些物种的分布也十分广泛，高山、湖泊、沼泽等地的生物往往与在周围低地栖息的生物有着密切关系；海岛生物与邻近大陆上的生物之间有着十分明显的关系；在同一群岛内，各个岛上的不同生物之间有着亲缘关系。这些事实都无法根据特创论的观点解释清楚。但如果我们承认移居生物来自传播便利的原产地，并且能够适应新栖息地，那么这一切事实便很容易理解了。

上一章及本章摘要

在这两章里，我想努力说明的是：如果我们承认自己对于近期的气候变化、陆地水平面变迁和其他方面的变动对生物分布的影响知之甚少；如果我们清楚自己对生物各种奇妙或偶然的传播方式一知半解；如果我们还记得（这是很重要的一条），某个物种原先在广大地区连续分布，然后在中间地带灭绝的事实是如何频繁地发生，那么，我们就会相

信，不论同一物种的所有个体是在什么地方发现的，它们都来源于一个共同的祖先。根据各种传播障碍物的重要性、属和科的相似分布情况，我们和许多博物学家都得出了一致的结论，并将它称为“生物单一中心起源论”。

我的学说认为，同属内的不同物种都是从同一个原产地向外传播的。假如我们承认自己知识贫乏，并且记住某些生物类型的变异很慢，因而有足够长的时间供它们迁徙，那么，这个观点就很有可能解释清楚了，尽管还是存在一定的难度，类似解释“同一物种的个体分布”所遇到的情况。

为了说明气候变化对生物分布的影响，我曾指出最后一次大冰期有着非常重要的作用，甚至能够影响赤道地区。而在南北冰期交替时，南北半球的生物会混合在一起，并把一部分生物遗留到世界各地的山顶上。我还较为详细地讨论了淡水生物的传播情况，以便说明生物的各种偶然传播方式。

如果我们承认，在很长的时期内，同种的所有个体和同属的某些物种都来自某一个原产地，那么根据迁徙理论，所有生物地理分布方面的主要事实以及迁徙后的变异和新类型的增加都可以得到合理的解释。如此一来，我们便能明白障碍物的极大重要性，无论障碍物是海洋还是陆地，不仅可以将动植物分隔开，还会形成很多个动物区系和植物区系。由此我们便可以知道，为什么近缘物种会集中分布在同一地区，为什么在不同纬度下，例如南美洲的平原、高山、森林、沼泽及沙漠的生物，都以神奇的方式被联系起来，而且和原来在同一大陆上栖息的已灭绝生物有着同样的联系。如果我们承认所有关系中最重要的是生物与生物之间的亲缘关系，那么就可以知道为什么截然不同的生物会生存在自然地理条件几乎完全相同的两个地区。因为根据生物迁入新地区后的时间长短以及迁移的难易程度，不同地区迁入生物的种类和数量都有着很大的差别；根据生物迁入以后新老居民之间生存斗争的激烈程度以及迁入生物发生变异的快慢等，生物在两个地区或多个地区的生存条件发生了很大的变化，导致生物与生物之间产生了极其错综复杂的关系。结果，一些生物类群发生了显著变异，另一些却只发生了轻微的变异；一些类群进化得很快，另一些类群却几乎没有进化。这些现象，我们在世界几个

大地理区都可以看到。

这些相同的原理让我们明白，为什么海岛上只有很少数量的生物类型，且其中大部分又是本地特有的种类；为什么由于迁移的方式不同，有的类群里所有物种都是海岛上特有的，而另外的类群，甚至是同纲的另一类型的所有物种，与邻近地区完全相同。我们还能够明白，为什么海岛上缺乏两栖类和哺乳类等整个大类的生物；而另一方面，即使在最孤立的小海岛上，也有飞行的哺乳类（即蝙蝠）其特有的种类。我们也可以知道，为什么海岛上是否存在哺乳动物（或多或少发生了变异的），与该岛和大陆之间海洋的深度有着一定的关系。我们能清楚地看到，为什么虽然一个群岛的各小岛上的生物种类不同，但彼此间却有着密切的亲缘关系，并和最邻近的大陆生物或其他迁徙来源地的生物也存在着某种亲缘关系，尽管这种关系比较疏远。我们更能领会，如果两个地区存在极近缘的物种，则不论这两地相距多么遥远，一定存在若干相同的物种。

正如已故的福布斯先生所主张的那样，支配生命的规律在时间和空间上非常相似。从许多事实可以发现，控制过去时代生物演替的规律，与控制现代不同地区生物类型差异的规律几乎是相同的。在时间上，每个物种和物种群的分布都是连续的；由于这一规律只有极少数例外情况——某种生物在一套地层的上下层位存在，而在中间层位缺失——所以我们便能合理地认为，之所以存在例外情况，是因为我们目前尚未在中间层位找到该物种。在空间分布上也是如此，即某物种或物种群的栖息地是连续的，这是一个普遍的规律，尽管也存在不少例外情况。不过，和我之前提到的一样，这些都可以根据以前迁徙时遇到的不同情况得到合理的解释，或是传播方式的不同，或是该物种在中间地带的灭绝。物种和物种群在时间和空间上都有自己发展的顶点。生存在同一时代或同一地区内的物种群，往往具有纹饰、颜色等共同的微小特征。我们观察过去漫长的连续时期，如同观察全世界的遥远地区一样，会发现某些纲的物种之间差异很小，而另一些纲或目里不同组的物种之间却差异很大。在时间和空间上，每个纲里的低等生物通常要比高等生物变异少。当然在这两种情况中，这一规律都存在显著的例外。我的学说认为生物在时间和空间上的分布规律都是很清楚的，这是因为我们观察的那些近

缘生物，不论它们是在连续时代中发生的变异，还是迁移到新环境后发生的变异，都遵循了相同的演变法则；变异规律在这两种情况下是一样的，而且所发生的变异都是自然选择作用积累的结果。

第十四章：生物间的亲缘关系：形态学、胚胎学和退化器官的证据

分类

生物之间的相似程度是有差别的，可以划为大小不一的不同类型。这种分类并不是随意划分的。如果一个生物类别仅适应于陆地生活，另外的类别仅适应于生活在水中；一种适应于肉食，另外的则适应于草食，这样的划分方法就过于简单了。实际情况更复杂一些，甚至同一亚群中的生物常常具有不同的习性。关于变异和自然选择，在第二章和第四章中，我试图说明，在任何地区，只要是广泛传播、分散和常见的物种就是每个纲中最具优势的物种，而且是最容易发生变异的物种。首先出现变种，然后变成有显著特征的物种。按照遗传法则，这些物种将会形成新的、占据主导地位的物种。因此，目前具有优势的物种类群将继续扩大。我还进一步指出，每个物种的变异后代都会在自然环境中尽可能多地占据位置，由此会表现出性状分歧的趋势。物种的繁多、竞争的激烈以及物种驯化等，这一事实在很多地方都得到了证实。我也曾想说明，凡是数目不断增加、性状不断分歧的类别，具有排挤、替代原先的分歧较小、进化较少类别的趋向。前文解释这几个原理的图表说明，从一个祖先繁衍下来的变异后代可以分化为很多群，而且群下面还可以再分群。图表顶线上，一个字母代表一个属，包括若干个物种，沿着上线的全部属共同构成一个纲。因为这些属是从一个共同的原始祖先传下来的，因此遗传了很多相同的特性。同理，拥有许多共性的左边三个属，形成了一个亚科，而右边两个属则形成另一亚科；左右两边是从图表上的第五个阶段开始出现分歧的。尽管不如隶属于同一亚科内各属之间的关系密切，这五个属也有许多相同之处；它们组成一个科，与更右边的三个属组成的科不同，后者在更早期便已出现分歧。因此，与从I传下来的那些属不同，从A传衍下来的这些属组成一个目。许多单一祖先传衍下来的物种，组成了许多属；这些属组成亚科，亚科再组成科，科再组成目，最后都归入一个大纲下。生物可以划分为大小不等的类别，这一

重要事实并不令人感到奇怪。对此，我可以做如下解释：很显然，就像其他物质一样，生物体可以根据许多方法进行分类，或者根据单一性状人为分类，或者根据多种性状自然分类。矿物或元素就可以这样分类。在这种情况下，既没有系统演替的关系，也没有分类原理可说。可是，生物的情况则不一样。上述看法与群下有群的自然排列是一致的，目前只有这种解释。

正如我们知道的，博物学者们试图用自然体系来排列每个纲内的物种、属和科。然而，这个体系的意义是什么呢？有些学者认为，这个体系是一个清单，将最相似的生物排列在一起，将最不相似的生物分开；还有些学者认为，这是一种人为地简单陈述普通命题的方法，即用一句话概括一群生物的共同特征，例如用一句话表明所有哺乳动物的特征，用另一句话表明所有食肉动物的特征，再用一句话表明狗属的特征，然后再加一句话完成对每一种狗的描述。这个体系的独创性和实用意义是不可否认的，但是许多博物学者认为这种自然体系还具有更重要的意义。他们相信，这个体系揭示了“造物主”计划；关于这个计划，我认为除非能够说明它在时间与空间的顺序，或者两个方面的顺序，或者其他方面的意义，否则对我们的知识没有太大的补充。例如，林奈先生有句名言常常出现在文献中（有时会以隐蔽的形式出现），他说：“特征不能造成属，而是属显示特征”这句话似乎暗示了分类不仅仅在于类似，还包含了更深层次的联系。对于这种说法，我很赞同，我认为这种联系就是指共同的祖传体系，是导致生物密切相似的原因，虽然会出现不同程度的变异，但是在分类中已经显露出来了。

现在，我们来研究一些分类学所依据的法则，以及上述说法所引起的种种困难，即分类是一种上帝创造计划，或者分类是一种简单的命题清单，把彼此最相似的生物类型集中起来等。也许有人会认为（古时的想法），能够决定生活习性的构造和生物在自然体系中的位置是分类的重要依据，这种看法是错误的。没有人会认为老鼠与鼹鼠、儒艮与鲸、鲸与鱼等在外形上的相似性有什么重要意义。这些相似性虽然与生物的整体生命密切联系，但是仅仅具有“适应的与同功的性质”；我们以后还会继续讨论这一问题。不过，我们甚至可以认为这是一条普遍的法则：与生物的特殊习性关系越小的构造，在分类学上的重要性就越大。举个

例子，欧文在谈到儒艮时曾说：“生殖器官对于动物的习性和食性方面的作用最小，所以我认为这是最能体现亲缘关系的构造。对于这种器官的改变，我们不会将适应性状当作主要性状。”对于植物来说，最引人注意的、生活上必不可少的营养器官在分类学上几乎没有什么价值；而生殖器官、种子与胚珠却十分重要。又如前文中所讨论的一些形态特征，在功能上并不重要，而在分类上具有很大的用处。因为这种器官的性状在同源的类群中很固定，这种固定的主要原因是自然选择只对有用性状发挥作用，而不会保留和积累这种器官的轻微变异。

可以认定的是，仅凭器官的生理重要性，并不能确定其分类价值。在近缘类群中，相同的器官几乎具有相同的生理价值，而它们在分类上的价值却各不相同。经过长期研究，博物学者对各生物类群中的这种情况都感到十分惊奇。在这里，我们可以引证最高权威布朗的话。他在讲述龙眼科的某些器官对于属的重要性时曾说：“据我所知，这和其他所有部分一样，不仅在这个科内，在其他各自然科内，它们的价值也是不一样的，在某些情况下似乎完全没有意义了。”在另外的著作中，他说：“牛栓藤科内的属，区别在于有一个或多个子房、有胚乳或没有胚乳、花瓣为叠瓦状或镊合状等方面。”上述特征中任何一个性状的重要性都超过了属的性状，在这里虽然将所有性状合并，但也无法区分兰斯梯斯属与牛栓藤属。我们来看一个昆虫的实例：韦斯沃特曾发现，膜翅目的某一大支群中，触角的特征是最固定的，但在另一支群中却有差别。在分类上，这种差别并不重要；但是，不会有人说这两大支群的触角具有不等的生理重要性。此外，在同一类生物中，有很多同样重要的器官在分类学上价值不一的例子。

另一方面，残留器官和退化器官具有重要的生理或生命意义；不可否认，这类器官在分类上具有很重要的价值。大家都知道的是，对于显示反刍动物和厚皮动物密切的亲缘关系方面，年轻反刍动物上颌骨上的残留牙齿和腿部的残留骨骼是有很大用处的。布朗强调，禾本草类残留小花的位置在分类上具有重要价值。

我们再来看一些实例。有些构造在生理上很不重要，但是人们认为它们的性状对于确定整个类群生物的定义极有用处，例如，欧文说，从鼻腔到口内是否有一个敞开的通道，可以用来区别鱼类和爬行动物；此

外还有昆虫翅膀褶皱的方式、某些藻类的颜色、禾本科草类花上的细毛、脊椎动物真皮覆盖物的性质（毛或羽）等。如果鸭嘴兽体外生羽毛而不长毛，那么这个外部细微的特征将是鉴定鸭嘴兽与鸟类亲缘关系远近的重要标准。

细小的性状在分类学上的重要性，主要是由它们和许多其他性状的关系（后者也有几分重要性）决定的。很明显，性状的集合在自然演化史中具有重要价值。因此，就像人们常说的，在某些性状方面，一个物种可以同它的近缘物种存在差异，但这并不影响它的分类地位。因此，我们常常会发现，根据任何单项特征建立起来的分类系统，不论这种特征多么重要，也是不可靠的；因为机体上的任何部分都不是固定不变的。即使许多性状都不重要，但是集合起来便有重大价值；这种性状集合的重要性可以解释林奈的名言——“特征不能造成属，而是属显示特征”；这句话好像是建立在许多相似点的细微鉴别上，这些相似点太细微了以至难以鉴别。金虎尾科中有些植物的花，有的是完全的，有的则退化了；朱西厄在评论后者时曾说，“原来属于该物种、该属、该科、该纲特有的许多性状消失了，这简直像在对我们的分类开玩笑。”当亚司派卡巴属进入法国后，几年内只留下了一些退化的花。在构造上许多最重要的方面，它都和本目典型的物种有着很大的差异。但是，据朱西厄所说，理查德凭借敏锐的眼光将该物种列入金虎尾科，这种做法体现了分类学者的敬业精神。

事实上，博物学者在鉴定一个类群或任何一物种所依据的性状时，并不会考虑它们的生理价值如何。如果他们发现一种性状是大多数类型共有的，那么这种性状的价值就很高；如果这种性状只是少数类型共有的，那么这种性状的价值就很低。一些博物学者认为这个原则是正确的，著名的植物学者圣提雷尔更是明确地予以认同。如果好几个细小性状常常被一起发现，尽管它们之间并无明显的同源关系，也应认为具有重要价值。重要器官，例如心脏、呼吸器官或者生殖器官等，在大多数动物群中都相当地一致，因此它们在分类上具有重要价值；但是在某些类群中，这些重要的生存器官所表现出来的性状是次要的。因此，就像弗里茨·缪勒所说的，在甲壳纲内，海萤属拥有心脏，而和它有着密切关系的贝水蚤属与金星虫属却没有心脏；海萤属中的一个种拥有十分发达

的鳃片，而另一个种却没有。

为什么胚胎性状与成体性状同等重要？因为自然分类法本来是包括一切年龄阶段的。但是，我们还不清楚为什么胚胎的构造在分类上比成体的构造更加重要，而在自然组成中，只有成体构造才可以发挥充分的作用。然而，著名的博物学者爱德华兹和阿加西斯极力主张，胚胎的性状在所有的性状中是最重要的；这一理论被普遍认可。然而，由于没有幼虫适应的性状，它们的重要性有时被夸大了。为了说明这一点，缪勒根据幼虫的性状对甲壳类这一大纲进行了排列，结果说明这不是一个自然排列。但是，除了幼体性状外，胚胎性状在分类中具有最重要的价值。不仅动物如此，植物也是一样。因此，显花植物的主要划分依据是胚胎性状的差异，即子叶的数目与位置、胚芽与胚根的发育方式等。现在，我们明白为什么这些性状在分类上具有如此重要的价值了，因为自然系统是根据谱系进行排列的。

亲缘关系常常直接影响到分类。没有什么比确定所有鸟类共有的许多性状更容易的了；但是在甲壳类中，这样的确定迄今被认为是无法实现的。甲壳类中有两个极端的类型，它们之间几乎没有一个共同的性状；但是两个极端物种与其他物种很相似，而这些物种又与另一些物种相似。如此关联下去就会发现，两个极端物种属于甲壳类这一纲，而不是其他纲。

地理分布常常被用在分类上，尤其是很相似的大类群的分类方面。邓明克认为，这个方法对于鸟类的某些类群是有效的。甚至，某些昆虫学家和植物学家也会采用这个方法。

最后，关于不同种群的比较价值，例如目、亚目、科、亚科和属等，几乎是随意估定的。一些著名的植物学者，例如本瑟姆先生与其他人士，都曾强烈主张它们的任意性价值。在植物和昆虫里面，一个类群起初被很有经验的博物学家仅仅定义为一个属，后来上升为一个亚科或者一个科；不是因为发现了重要构造上的差异，而是因为具有轻微差别的许多近似物种陆续被发现了。

如果我的观点是对的，那么根据“自然体系基于世系演变”的见解，都可以解释上述关于分类的规则、依据和难点。博物学家认为，可以显

示两种或多个物种之间亲缘关系的真正性状是从一个共同的祖先那里遗传而来的。真正分类的依据都是谱系，共同的谱系就是博物学家无意中发现的隐藏联系，而不是一些不可知的造物主设计，也不是一种普通命题的叙述，更不是把许多相似对象简单地合在一起或分开。

然而，我必须更充分地解释我的意思。我相信，如果想要十分恰当地处理每一纲内各类群谱系的排列、彼此的地位与关系，就必须严格遵循它们的世系；不过，在某些分支或类群中，虽然在血缘的远近方面与它们共同的祖先是相等的，但是所显示的差异量却十分不同，这是因为它们经历的演变程度不同，这个差异量是由该类型被放置在不同的属、科、分支或目中体现出来的。借助第四章的图表，我们可以很好地理解它的意义。假设从字母A到L代表生存在志留纪时期的近缘属类，它们来源于更早的时代。其中的A、F和I三个属，都有一个种留下了变异的后代并延续至今，这些后代由顶上横线的15个属（a^{14}至z^{14}）来表示。现在，所有从这三个种传下来的变异后代，都具有相同的血缘与血统关系，可以把它们看作第100万代的堂兄弟；可是，它们之间有着很大差异。从A遗传下来的类型，现在分化为两个或三个科，构成一个目。由I遗传下来的类型也分化为两个科，组成了不同的目。由A遗传下来的现存物种与亲种A已经不是同一个属；同样的道理，从I遗传下来的现存物种与亲种I也不是同一个属。假设F^{14}属依然存在，只是发生了一些微小的变化，那么它将与祖属F被归于同一属；正像某些极少的现存生物属于志留纪的属一样。因此，这些在血统上有着相同程度关联的生物，它们之间差异的比较价值就十分不同了。尽管如此，它们谱系的排列依然是正确的，不仅现在如此，将来也是如此。从A遗传下来的变异后代有着一些共同的性质，就像从I遗传下来的后代从自己的祖先那里继承下来的特性一样；在每个后续时期，每个继承后代的每一旁支也是如此。不过，如果我们假设A或I的任何后代已经发生了巨大变异，以至于失去了祖先的所有痕迹，在这种情况下，它们在自然系统中的位置也将消失，极少的现存生物就出现过这种现象。沿着它的整个系统线，假如F属的所有后代只有很少的变化，它们就会形成一个单一的属。虽然这个属很孤立，但是始终占有特殊的中间位置。如这里用平面图指出的，各种群的表示未免过于简单，各分支应该向各个方向发射出去。如果只是依直线书写各类群的名称，将会显得更不自然了。在自然界中，试图用平面

上的一条线来表示同一群生物间所发现的亲缘关系，这显然是不可能的。因此，自然系统是依据世系排列的，看起来好像一个家谱。但是不同类群所经历的演变量，必须用不同的属、亚科、科、支、目和纲来表示。

用一个语言的例子来说明这个分类的观点可能是有益的。如果我们拥有一个完整的人类谱系，那么人种的系统排列将对全世界现存所有语言提供最好的分类标准；如果所有被废弃的语言、中间性质的语言以及缓慢变化的方言也包括在内，那么这样的排列将是唯一可能的分类。但是，某些古老的语言改变很小，产生的新语言也很少，而由于同宗民族在散布、隔离与文化状态的关系，其他的古老语言则曾经发生过很大的改变，产生了许多新方言和新语言。同一语系不同语言之间不同程度的差异，必须用群下有群的方法来表示；但是，合适的甚至唯一可能的排列将是系统排列；而且，严格是自然的，因为它将根据密切的亲缘关系，把所有语言——古代的和近代的联结起来，并且表示出每一种语言的分支与起源。

为了证实这一观点，我们来看一下已知的或者确信由单一物种形成的变种的分类。这些变种位于物种之下，而亚变种又位于变种之下。某些特殊情况下甚至存在其他等级的差异，例如家鸽。变种分类与物种分类遵循着大致相同的规则。许多人坚决主张变种排列的必要性，强调需要用一种自然系统代替人为系统。例如，我们明白，不要仅仅因为凤梨（菠萝）两个种的果实（虽然是最重要的）相似，就轻率地将它们放在一起；虽然瑞典芜菁与普通芜菁的块茎十分相似，但是没有人把它们归到一起。凡是最固定的构造部分，在变种分类方面有着最重要的作用。因此，著名农学家马歇尔认为，牛角对于牛的分类最为有用，因为与身体的形状和颜色比起来，角的变化最小；但是，羊角的性质较不固定，因此很少被用于分类。对于变种分类来说，如果我们拥有一个真正的宗谱，系统分类法就会优先被广泛采用。事实上，它已经被应用到一些场合了。我们可以确信，不管存在多少变异，相似点最多的类型将会因为继承原则而聚合在一起；虽然某些翻飞鸽亚变种的喙长有所不同，但是由于具有翻飞的共同习性，它们仍然被归并在一起。但是，短面种类几乎已经丧失了这种习性；尽管如此，我们仍然把它们与翻飞的种类归为

一类，这是因为它们的血统相近，而且在其他方面也有相似之处。

对于自然状态下的物种来说，每一位博物学家都会依据血统关系 进行分类。在最重要的性状方面，这些物种的两性有时表现出巨大的差异。例如，某些蔓足类的成年雄体与雌雄同体的个体之间几乎没有任何相同之处，但是没有人想要分开它们。三个兰花植物类型——和尚兰、蝇兰和龙须兰，曾经被列为三个不同的属，但是只要发现它们出现在同一植株上，就会立刻被降为变种。现在我可以表明，这三个兰花植物类型分别是属于同一物种的雄性、雌性和雌雄同株的个体。博物学家将同一个体的不同幼体阶段划分在一个物种里，不管它们彼此之间的差别与成虫的差别有多大。斯登斯特鲁普所说的交替的世代也是如此，它们只能在学术意义上被看作同一个体。博物学家把畸形和变种划分在同一个物种内，不是因为它们与亲本类型部分相似，而是因为它们是从同一亲本类型遗传下来的。

虽然雄体、雌体和幼体有时是极不相同的，但是，同种个体的分类普遍地应用了血统原理；有一定改变和有时有较大改变的变种，也是根据血统来分类的。因此，种归于属，属归于较高的类群，一切归在所谓的自然体系之下，是在运用同一血统因素在分类。我相信，已经在不知不觉中应用了血统因素。这样，我们可以了解最优秀的分类学家们所依据的一些准则与纲领。我们没有既成的宗谱，只能依靠某些种类的相似点去追溯血统的共同性。因此，我选择了那样一些性状来分类，即每一物种在最近的生存条件下最不容易发生变化的性状。按照这一观点，残留构造与身体上未退化的构造在分类上有着相同的重要性，有时甚至更为适用。一种性状，不管它多么微小，例如颚的角度大小、昆虫翅膀的折叠方式、皮肤的附着物是毛发还是羽毛等，只要它是许多不同物种的共同性状，特别是在那些生活习性很不相同的物种中是普遍存在的，就具有很高的分类学价值，因为我们只能用来自共同祖先的遗传来解释为什么这一性状能存在于如此众多不同习性的类型里。如果只能根据某一构造进行分类，就很容易犯错误。不过，即使很不重要的性状，只要它们同时存在于不同习性的生物中，根据血统理论也可以得知，这些性状是从共同的祖先遗传下来的；在分类上，这种集合的性状具有特殊的价值。

我们都知道，为什么某个物种或某个物种的集群在一些重要特征方面会与自己的伙伴不同，但又被分类到一起。只要拥有足够数量的共同性状，不管多么不重要，一旦显露出血统共同性的潜在联系，就可以这样分类。即使两个类型的性状都不相同，但如果这些极端的类型被某些中间类群联结到一起，我们就能立刻推测出它们血统的共同性，并将它们归入同一纲中。我们发现，在生理上最重要的器官（在不同的生存条件下用以保存生命的器官）通常是最固定的，因此它们具有特别的价值。但是，如果这些相同的器官在其他群中存在很大的差异，那么在分类中的评价就会被降低。我们将会看到，胚胎的性状具有很高的分类重要性。地理分布有时在大属的分类中能起到有效的作用，因为生活在不同地区的同属物种，基本上都是从一个共同祖先遗传下来的。

同功的类似性

根据上述观点可知，真正的亲缘关系与同功或适应的类似性之间存在很大的差别。首先注意到这个问题的是拉马克，随后还有马克里及其他人。在身体形状和鳍状前肢方面，儒艮和鲸之间的类似，哺乳类与鱼类之间的类似，都是属于同功的。不同目的鼠与鼩鼱之间的类似也是如此；密伐脱先生所主张的鼠与澳大利亚小型有袋动物之间的类似也是如此。我认为，最后这两者的类似可以做如下解释，即适应于在灌木丛和草丛中进行相似的积极活动，以便躲避敌害。

昆虫里也有无数相似的例子，林奈就曾经受到表面现象的迷惑，把一个同翅类的昆虫归入了蛾类。在家养变种中，也可以看到类似的情况，例如中国猪和普通猪的改良品种在形体上有着明显的相似性，而它们却来自不同的物种；又如普通芜菁和瑞典芜菁的加厚茎部十分相似；细腰猎狗和赛马之间的相似，类似于某些作者所描述的大不相同的动物。

性状，只有在能够揭示血统关系时才对分类具有重要意义。我们明白，为什么同功或适应的性状对生物的繁殖具有极为重要的意义，但在分类学上却毫无价值。这是因为两个血统不同的动物可以变得适应相似的条件，并由此获得相似的外部形态。但是，这样的相似不但不能揭示这两种动物的血统关系，反而掩盖了它们真正的血统关系。因此，我们

也可以理解这样的矛盾。当两个群互相比较时，完全相同的性状是同功的。而当同一群的成员互相比较时，则显现了真正的亲缘关系。例如，将鲸和鱼比较，身体形状和鳍状前肢是同功的，表示两个纲都具有游泳功能；然而，将鲸族（科）的一些个体成员进行比较时，身体形状和鳍状前肢则显示了真正亲缘关系的性状，这些部分在整个科中都非常相似，我们不得不相信它们是从一个共同祖先遗传下来的。鱼类也是如此。

许多实例说明，对于十分不同的生物来说，由于具有相同的功能，生物的某个部分和器官之间会具有十分惊人的相似性。狗和塔斯马尼亚狼或袋狼是自然系统中很不相同的两种动物，但它们的颚却非常相似。但是，这种相似只局限于一般外表，如犬齿的突出和臼齿的切割形状。事实上，牙齿之间还存在很大的差异，例如狗的上颚的每一边都有四颗前臼齿，但是只有两颗臼齿；袋狼有三颗前臼齿和四颗臼齿。这两种动物的臼齿在大小和结构方面也有很大的区别；而且在成齿长出之前，乳齿也极为不同。当然，任何人都不可否认，这两种动物的牙齿经过自然选择的作用，已经适应了撕裂肉食的需要。然而，如果承认这种情况曾经在一个例子中发生，而在另外的例子中被否定，我认为是不可能的。值得高兴的是，著名权威弗劳尔教授也得出了同样的结论。

在上一章里所列举的特殊情况，都可以归入同功的范畴。但是，由于这些情况都很特殊，所以常常被当作我的学说的难点与异议。我们可以发现，在所有这些情形下，它们器官的生长与发育存在巨大差异，成年构造中也是如此。它们要实现的目标是一致的，虽然使用的方法从表面看来相同，但是本质却不一样。以前在同功变异的名义下提到的原则也常常在这些情况下起作用。虽然同纲的成员亲缘关系疏远，但是它们继承了许多共同的特征，往往在相同的刺激下以相似的方式发生变异。很显然，自然选择使它们获得彼此相似的构造与器官，而与共同祖先的遗传没有关系。

不同纲的物种经过连续细微的变异之后，常常生活在十分相似的环境条件下，例如陆地、空中和水里这三种环境中。因此，我们或许可以理解，为什么有时不同纲的亚群里会出现数字上的平行现象。某位博物学家认为，任意提高或降低某些纲中类群的分类价值（我们的所有经验

表明，对它们的评价至今还是任意的），就能容易地把这种平行现象扩展到更广阔的范围内。如此一来，便出现了七项、五项、四项和三项标准的分类法。

另一种特殊情况是，外表十分相似，并不是为了适应相似的生活习性，而是出于保护作用。我指的是贝茨先生曾经说过的，一些蝴蝶模拟了另外一些不同物种的奇异方式。贝茨先生指出，在南美的一些地区生存着一种透翅蝶，它的数量很多，常常大群聚集，而在这群蝴蝶中常常能发现另外一种蝴蝶混杂其中，即异脉粉蝶。异脉粉蝶与透翅蝶在颜色浓淡、条纹、翅膀的形状等方面颇为相似，即便贝茨先生有11年的采集标本经验且目光十分锐利，也难免受骗。当人们捕获到这两种蝴蝶并加以比较时，发现它们的基本构造很不一样。这两种蝴蝶不仅属于不同属，而且常属于不同科。如果这个模拟只是见于一两个事例，可以被认为是一种巧合。但是，我们还可以找到更多的属于类似两个属的模拟者和被模拟者，而且同样极为相似。有这种情况的大约有10多个属，模拟者和被模拟者总是生活在同一地区；我们从来没有发现一个模拟者与被模拟者相隔很远的情况。模拟者几乎都是稀有昆虫，被模拟者几乎都是成群聚集的。在异脉粉蝶模拟透翅蝶的地方，有时还有别的鳞翅类昆虫模拟同一种透翅蝶。由此产生的结果是，同一个地方能够找到三个属的蝴蝶，甚至还发现有一种蛾也非常相似于第四个属的蝴蝶。值得我们注意的是，异脉粉蝶的许多模拟者仅仅是同一物种的不同变种，被模拟者也是如此；而其他类型则是不同的物种。也许人们会有疑问：为什么要把某些类型看作被模拟者，把其他类型看作模拟者呢？贝茨先生的回答显然十分令人满意——他说，被模拟的类型保持着它那一个群原有的装饰，而模拟者则改变了自己的装饰，并且与它们最近缘的类型不再相似了。

接下来，我们来研究一下，为什么某些蝴蝶和蛾类常常获得另一个完全不同类型的装饰？对此，博物学家也常常感到很疑惑，为什么“自然”也会玩弄欺骗的手段？毋庸置疑，贝茨先生已经有了答案。被模拟者总是成群聚集的，必定能大批地逃避毁灭。否则的话，它们就无法生存并保存那么长时间。现在已经有大量证据证明，被模拟者是鸟类和食虫动物不喜欢吃的。另一方面，栖息在同一地区的模拟者是比较稀少的，

属于稀有类群。它们想必常常遭遇危险，否则根据所有蝶类的产卵数量，它们将会在三至四个世代内繁衍并遍布整个地区。现在，如果一个稀有类群中的一个成员获得了一种外形，这种外形与一种受良好保护的物种是如此相似，以至它不仅能够骗过极富经验的昆虫学家的眼睛，也能骗过掠夺成性的鸟类和昆虫。因此，它常常能逃过被毁灭的厄运。实际上，贝茨先生目睹了模拟者变得与被模拟者相似的过程；他发现异脉粉蝶的某些类型模拟了许多其他的蝴蝶，并且发生了很大的变异。在同一个地区产生的几个变种，其中仅有一个变种在某种程度上与该地区常见的透翅蝶相似。而另外地区的二至三个变种中，其中一个远比其他变种常见，它极力模拟着透翅蝶的另一种类型。根据这一事实，贝茨先生推论：异脉粉蝶首先发生变异；当一个变种和栖息在同一地区的任何普通蝴蝶在一定程度上相似，那么由于这个变种和一个繁盛的、很少受迫害的类型相似，往往能避免被掠夺成性的鸟类和昆虫所毁灭，因此常常被保留下来。相似程度比较低的，就一代接一代地被排除了，只有相似程度高的才能保留下来，繁衍后代。所以，这是一个自然选择的最佳实例。

华莱士和特里门先生也描述了马来半岛和非洲鳞翅类昆虫的情况，其中有一些明显的模拟实例。但在大型四足类中，我们还没有发现这样的模拟实例。对于昆虫来说，模拟的频率比其他动物大，这大概是由于它们身体小的缘故。昆虫不能保护自己，除了确实带刺的种类。我从来没有听说过那些带刺种类模拟其他昆虫的例子，尽管它们常被别的生物模拟。由于不能通过飞翔逃避来吞食自己的更庞大的动物，因此昆虫和大多数弱小动物一样，被迫采用欺骗和掩饰的手段来躲避灾害，得以生存。

一般来说，颜色大不相同的类型之间大概不会出现模拟的现象，而彼此有点儿类似的物种会出现模拟的现象。如果相似是有益的，就能很容易地以上述手段实现。如果被模拟者后来因为某种原因发生了变异，模拟者也会发生变异，其变化轨迹几乎与被模拟者一模一样。这样，与所属那一科的其他成员相比，模拟者就会获得完全不同的外表或颜色。不过，在这一方面也存在一些困难，因为在某些情况下，我们必须假定几个不同群的古老成员在还没有分异到现在的程度之前，偶然与另一个

受到保护的类群的成员相似，从而也得到了某种程度的保护，这样，就逐步产生了完全相似的基础。

关于联结生物亲缘关系的性质

在大属中，优势物种的变异后代具有继承优越性的倾向。这种优越性使得它们所属的群更加壮大，且促使它们的双亲具有优势。因此，它们可以广泛地传播，在自然界中占据越来越多的位置。每一纲里较大和较具优势的群往往会不断扩大，排挤掉许多较小和较弱的群。因此，我们能够解释这些事实：所有现存和已经灭绝的生物，被包括在少数的目和纲中。这个事实是令人惊讶的：高级类群的数量非常少，但在全世界的分布却又十分广泛。以至在澳洲被发现后，也无法建立一个新纲。胡克博士曾告诉我，在植物界，也只是增加了两三个小科而已。

在有关地层序列的那一章里，我曾说过，在漫长而连续的变异过程中，每个群的性状都会出现较大分歧。为什么比较古老的生物类型的性状在一定程度上能代表与现存种群之间的中间类型呢？这是因为某些古老的中间类型能把变异很少的后代遗传到今天，形成我们所谓的中介物种或畸变物种。一个类型越是畸形，那么已经消失或完全消失的连接类型数量就越大。有一些证据表明，畸形的类群几乎仅有极少数代表物种，它们因为灭绝而遭受了严重的损失。按照现存情况来看，这些物种通常有很大的差异，而这更加意味着灭绝。例如鸭嘴兽和肺鱼属，如果不是像现在这样仅存单一物种，或两三个种，而是拥有十几个种，那么它们的数量大概也不会减少到如此稀少的程度。对于这些情况，我们只能这样进行解释：畸变类型是被较为成功的竞争者战败的类型，它们只有少数成员残存了下来。

沃特豪斯先生曾说过，当动物中一个群的成员对另一个很不同的群表现出亲缘关系，这个亲缘关系在多数情况下是抽象的，而不是具体的。因此，根据沃特豪斯先生的意见，在所有的啮齿类中，绒鼠与有袋类的关系最为密切。但是，就绒鼠与有袋类相似的几点来看，关系一般。也就是说，它并不是与有袋类某个具体物种更接近。因为亲缘关系的诸点是真实的，不只是适应性的，所以我们推测，绒鼠与有袋类就必须归因于由共同的祖先遗传这一点上。因此我们设想，包括绒鼠在内的

所有啮齿类都是从某种古老的有袋类分支出来的，而这种古老的有袋类与所有现存有袋类在性状上或多或少具有中间性质；或者啮齿类和有袋类都是从其共同的祖先分支出来的，并且此后在不同的方向上都发生了许多变异。不论依据哪种观点，我们都必须设定，绒鼠通过遗传从古老的祖先那里获得的性状比其他啮齿类更多，因此，它不会与任何一种现存有袋类有特别近的关系。不过，由于部分地保存了共同祖先的性状或者该群某些早期成员的性状，因而与有袋类间接地产生了关系。另一方面，正如沃特豪斯先生所指出的，在所有有袋类中，袋熊与啮齿类最为相似，不是与某一个具体物种，而是与整个啮齿目相似。但是在这种情况下，大家会怀疑这种相似可能仅是同功的，因为袋熊已经适应了啮齿类的习性。就不同科植物亲缘关系，德康多尔也做过类似的观察。

根据由共同祖先遗传下来的物种性状会不断增加与逐渐分支的原理，并且根据它们通过遗传保存了一些共同形状的事实，我们明白，通过非常复杂和辐射性的亲缘关系能够将同一科或者同一目的所有成员联结在一起。共同祖先通过灭绝分裂成群和亚群的整个科，将会把它的某些性状通过不同方式不同程度地改变遗传给所有物种。它们将通过迂回的亲缘关系迂回线相互关联（正如我们在第四章的图表中所看到的），并不断进化。即使通过系统树的帮助，人们仍然很难表示古代贵族家庭无数亲属之间的血缘关系。然而，如果没有系统树，就更不可能搞清楚其血缘关系。因此，我们能够理解下列情况：博物学家在一个大的自然纲里能够看出许多现存成员和灭绝成员之间的亲缘关系，但是如果没有图表的帮助，想描述这种关系也是很困难的。

正如第四章的内容，灭绝作用在确定和加宽每个纲中的几个群之间的间距方面起了重要作用。如此一来，我们可以解释各个纲之间存在明显界限的原因，例如鸟类与其他脊椎动物的界限。这样一来，许多古老的生物类型已经完全消失了。这些灭绝类型将鸟类的早期祖先与当时较不分化的其他脊椎动物连接在一起。然而，曾把鱼类和两栖类连接起来的中间类型灭绝得较少。在某些纲中，如甲壳纲，灭绝得更少。因为在这里，最奇异的类型被一个缺失部分亲缘关系的链条连接在一起。灭绝只能限定群的界限，不能制造群。如果曾经在这个地球上生活过的每一个类型突然重新出现，尽管我们不能给每一个群建立明显的界限，但至

少能按其自然的排列关系建立一个自然分类体系。根据图表我们能看出，从字母A到L，可以代表志留纪的11个属，其中有些已经产生了变异后代的大群。每一个分支和亚支的演化链条仍然存在，这些链条并不比现存变种之间的链条更大。在这种情况之下，很难下一个定义把一些群的成员与它们有直接关系的祖先和后代分开。尽管如此，图表上的排列仍然是有效的。根据遗传的原理，譬如所有从A遗传下来的类型拥有一些共同点。在一棵树上，我们能区分出不同的树枝，尽管分叉处的树枝是连在一起的。我说过，虽然不能分清几个群的界限，但是我们能够选择模式或类型来表示每个群中的大部分性状，不管这个群的规模是大还是小。这样，就勾勒出了不同群之间差异值的轮廓。要是可以搜集到某个纲的全部类型，这正是我们应依据的方法。然而，我们将永远不会完成这样圆满的工作。虽然如此，在某些纲里，我们正在向着这个目标前进。最近，爱德华兹在一篇优秀论文里主张采用模式的高度重要性，不管我们能否把这些模式所属的群划分开来并明确它们的界限。

最后，我们发现自然选择和竞争总是一起出现，这几乎必然会导致任何亲种后代的灭绝与性状分歧。它解释了所有生物亲缘关系中的普遍特征，即群下分群的从属关系。我们用血统这个要素，将两性个体与所有年龄的个体归在同一个物种中，尽管它们只有少数性状是相同的。我们根据血统对已知变种进行分类，不管它们与自己的双亲有多大区别。我相信，血统这个要素就是博物学家在自然系统下追求的潜在联结纽带。关于自然系统这个概念，在完整的范围里，它的排列是系统的，其差异的程度用属、科和目等术语来表示。根据这个概念，我们就能够理解分类中需要遵循的规则，以及为什么某些相似性的价值高于其他相似性；为什么我们要采用残留的、无用的器官，或生理用途很小的器官来进行分类；为什么探讨不同类群的亲缘关系时，我们不采用同功性状或适应性状，而在同一群的范围内却采用这些性状。我们能够清楚地看到，为什么所有现存类型和灭绝类型能够汇集在少数几个大纲里；为什么每个纲的若干成员能被最复杂的亲缘关系辐射线连接起来。或许，我们永远也解不开某个纲的成员之间的亲缘关系的“蜘蛛网”；但是当我们在观念上有一个明确目标，而且不去祈求某种未知的创造计划，就有希望得到确实但是缓慢的进步。

赫克尔教授在《普通形态学》和其他著作中，运用自己渊博的知识与才能讨论了系统发生，或称所有生物的血统图。他在描绘几个系统时，主要依靠的是胚胎学性状，也借助了同源器官和残留器官，以及各种生物类型首次出现在地层中的连续时期。这样，他勇敢地跨出了伟大的第一步，并指明了将来应如何处理自然分类问题。

形态学

我们看到，不论同一纲成员的生活习性如何，它们躯体的总体设计是相似的。我们常常用“构架一致”这个术语来表示这种相似性，或者说一个纲不同种的某些构造和器官是同源的。“形态学”这个总术语包含了整个命题。这是自然历史最有趣的一门学科，而且几乎就是自然历史的灵魂。适于抓握的人手、便于挖掘的鼹鼠前肢、马的腿、海豚的鳍和蝙蝠的翅膀，都是以同一构架组成的，而且在对应的位置拥有相似的骨骼。还有什么现象能比这些更加奇妙呢？我可以举一个惊人的例子：袋鼠的后肢非常适于在开阔的平原上奔跑，澳洲熊（即考拉）的后肢适于抓握树枝，袋狸的后肢以及其他一些澳洲有袋类的后肢都拥有特别的构架，即第二、第三趾骨极其瘦长且被包在同一张皮内，看上去好像是具有两个爪的单独的趾。尽管有这种相似的构架，但是这几种动物的后肢是被应用于不同目的的。在美洲负子鼠身上，这种情况表现得更加惊人。美洲负子鼠的生活习性几乎和它们的澳洲亲戚相同，但它们的脚却很普通。弗劳尔教授在他的论文中提到：“我们可以将其称为构架的一致性。”但弗劳尔教授并没有过多解释这种现象。他在后面还加了一句：“难道这不是在暗示真正的亲缘关系，并从共同的祖先继承下来的事实吗？”

圣提雷尔极力主张同源部分的相对位置或连接关系；它们在形式和大小上有着很大的差异，但以相同的顺序连接在一起。例如，我们从来没有发现肱骨与前臂骨、大腿骨和小腿骨的位置颠倒过。因此，相同的名称可以用在不同动物的同源骨骼上。我们在昆虫的口器构造中发现了这一重要规律：天蛾的极长而呈螺旋形的喙，蜜蜂和臭虫折合的喙，以及甲虫极大的颚，它们彼此十分不同。这些有着不同用途的器官，都是由一个上唇、大颚和两对小颚经历无数变异而形成的。这一法则也适用

于甲壳类的口器与附肢的构造。植物的花也是如此。

想用功利主义或终极目的论来解释同一纲各成员构架的相似性，这是最没有希望的。欧文在《四肢的性质》一书中认为，这种企图是不会成功的。根据独创论的观点，只能说它就是这样，即“造物主”根据相同的设计把每个大纲的动物和植物创造出来。然而，这根本不是科学的解释。

根据连续轻微变异的选择学说，解释起来就会容易得多。每个变异对被改变的生物都有某种益处，但又常常因为相互作用影响生物体的其他部分。在这种性质的变化中，将很少或根本没有改变原始构架或变换各部分位置的倾向。一种附肢骨骼可以缩短和变扁到任意程度，以便当作鳍用；一种有蹼的手可以使它的所有骨骼或某些骨骼变长到任意程度，而且连接它们的膜也可以扩大，以作为它们的翅膀。可是，所有这些变异并没有改变骨骼构造和各部分的连接关系。如果我们假设所有哺乳类、鸟类和爬行类的共同祖先具有按照现行的一般构架组成的肢，不管它们用作何种目的，我们将立刻看出全纲动物肢的同源构造。昆虫的口器也是如此，我们假设它们的共同祖先具有一个上唇、下颚和两对小颚，而这些部分可能在形状上都非常简单；于是，自然选择可以解释昆虫的构造与功能上的多样性。尽管如此，由于某些部分的减小和萎缩，或由于与其他部分的融合，或由于其他部分的增加（这个变异都是可能发生的），一种器官的构架也许会变得隐晦不明，甚至是消失。在已经灭绝的巨型海蜥的鳍状物和某些吸附性甲壳类的口器中，它们的一般架构变得模糊不清了。

由这个问题派生出的另一个问题是系列同源，即同一个体不同部分或不同器官相比较，而不是同一纲不同成员之间的相同部分与相同器官相比较。大多数生理学家相信，头骨与一定数目椎骨的基本部分是同源的，也就是说，在数量和相互关联上是一致的。在所有较高级的脊椎动物纲里，前肢和后肢都是同源的。甲壳类非常复杂的颚和腿也是如此。众所周知的是，在一朵花上，花萼、花瓣、雄蕊和雌蕊的相互位置以及内部构造呈螺旋形排列并由变态叶组成的观点，都是很容易理解的。在畸形植物中，我们常常发现一种器官转变成另一种器官的现象；在花发育的早期或胚胎阶段，以及甲壳类和其他动物的同一阶段，成熟期变得

极不相同的器官起初却是非常相似的。

根据创造论的观点，系列同源的情况是多么难以理解啊!为什么脑子包含在数目巨大、形状奇特、代表脊椎的骨片所组成的“盒子”里呢？正如欧文所说，分离的骨片有利于哺乳动物的分娩活动，但是这种便利无法解释鸟类与爬行类头颅构造相同的情况。为什么构造相似的骨骼形成了蝙蝠的翅膀和腿，而又被用于飞和走这样完全不同的目的呢？为什么具有非常复杂口器的一种甲壳类，只有很少的腿呢？而与此相反的是，为什么具有许多腿的甲壳类却有着简单的口器呢？为什么每朵花里的萼片、花瓣、雄蕊与雌蕊的用途不同，但却是在同一模式下构成的呢？

根据自然选择学说，我们能够在一定程度上回答这些问题。在这里，我们不必考虑一些动物的身体是如何形成一系列构造的，或者它们如何分出具有相应器官的左侧与右侧，因为这类问题不属于我们的研究范围。但是，一些系列构造大概是由于细胞分裂、增殖而产生的，细胞分裂引起细胞的繁殖，并促使各部分构造的增殖。为了我们的目的，只需要记住以下事实就足够了：如欧文指出的，同一部分与同一器官的无限制重复，正是所有低级生物的共同特征；所有脊椎动物的共同祖先或许具有许多椎骨；关节动物的共同祖先或许具有许多环节；显花植物的共同祖先具有排列成一个或多个螺旋形的叶子。我们还发现，多次重复的部分不仅在数量上，而且在形状上也容易发生变异。因此，由于这样的部分已经具有相当的数量和高度的变异性，将会提供用途不同的材料；然而，它们将通过遗传保存原始痕迹或基本痕迹。这种变异通过自然选择为它们以后的变异提供了基础，并且从最初就具有相似的倾向，所以它们更容易保留这种相似性。在生长的早期，这些部分是相似的，而几乎处于相同的环境中。不管这样的部分发生了多少变异，除非它们共同的起源完全无法确认，否则它们就属于系列同源。

在软体动物的大纲里，能够显示不同物种的某些构造是同源的（仅少数为系列同源），例如石鳖的壳瓣；然而，我们却不能肯定地说，同一个体的某一部分与另一部分是同源的。这个事实很容易理解，因为在软体动物中，甚至在本纲最低级的成员中，我们无法像在其他动植物中所看到的那样，观察到某一构造无限制重复的情况。

可是，正如兰开斯托先生在一篇优秀的论文里说明的那样，形态学是一门非常复杂的学科。兰开斯托说，某些纲之间的重要区别被博物学家统一划分为同源。他指出，不同动物拥有相似构造是由于它们来自共同的祖先，但是随后又各自发生了变异。兰开斯托认为这种构造是同源的，而凡是不能这样解释的相似构造则属于同形的。兰开斯托相信，鸟类和哺乳类的心脏就是同源的，也就是说来源于一个共同的祖先；但是，在两个纲里，心脏的四个腔是同形的，即是独立发展起来的。与此同时，兰开斯托先生还举例说明同一个体身体右侧或左侧各个部分的密切相似性。我们将这些都称为同源。然而，它们与拥有共同祖先的不同物种毫无关系。同形构造和我分类的同功变化或同功一样，只不过我的方法并不完善。它们的形成可以归因为不同生物的各部分或同一生物的不同部分曾以相似的方式发生变异，或者说部分相似的变异为了同一目的或功能而被保留下来，对此，我们已经举过许多例子了。

博物学家常常认为，头颅是由变形的脊椎形成的；螃蟹的颚是由变形的腿形成的；花的雄蕊与雌蕊是由变形的叶子形成的，等等。就像赫胥黎提到的那样，在很多情况下，头颅和脊椎、颚和腿等并不是从现存的一种构造演变出来的另一种构造，而是从某种共同的、更为简单的原始构造形成的。但是，大部分博物学家仅仅在比喻意义上采用这种说法。他们的原意并不是想说，在漫长的遗传过程中，某些原始器官（在一个例子中是椎骨，在另一个例子中是腿）转化成了颚或头颅。然而，这种情况有着十分明确而强大的说服力，以至于博物学家无可避免地采用了这种意义清晰的说法。根据本书的观点，这种说法完全可以采用；而且，以下事实都可以部分地得到解释，例如螃蟹的颚，如果真的是从极简单的腿变形而来的，那么它们的大部分性状或许是通过遗传获得的。

发育与胚胎学

发育与胚胎学是整个博物学中最重要的学科之一。人们都知道的是，昆虫的变态体现在少数几个阶段。事实上，昆虫的变态具有无数隐蔽而缓慢的转化过程。就像卢布克爵士所主张的，某些蜉蝣的昆虫在发育期间要蜕皮20次以上，而每次蜕皮都会发生一些变异。通过这个例

子，我们发现变态活动是以原始的渐变方式实现的。许多昆虫，尤其是某些甲壳类，显示出在发育过程中所完成的构造变化非常奇特。而且，这样的变化在某些低等动物的世代交替中达到了顶峰。例如，一种分枝精巧的珊瑚性动物的水螅体零散地点缀在海底的岩石上，这十分令人吃惊。首先，这种水螅体是芽生的；然后，它会横向分裂，逐渐发展出巨大的浮游水母群。这些水母产卵，从卵中孵化出会游泳的极微小动物，它们依附在岩石上，慢慢发育成分枝的珊瑚状动物；如此，无止境地循环下去。世代交替和普通变态基本上是相同的，这一观点已得到华格纳的进一步支持。他发现，一种蚊即瘿蚊的幼虫或蛆通过无性生殖产生了其他幼虫，这些幼虫最终发育为成熟的雄虫和雌虫，再以普通的方式靠卵繁殖。

值得我们注意的是，当华格勒宣布他的发现时，有人问我如何解释这种蚊的幼虫的无性生殖能力？只要这种情形是唯一的，就很难解释。但是，格里木表示，摇蚊几乎也以同一种方式生殖。他相信，这种生殖方式在这一目中是普遍存在的。摇蚊的蛹具有这个能力，但是幼虫不具有；格里木进一步阐明，这个例子在一定程度上将瘿蚊与介壳虫科的单性生殖联系起来；单性生殖这个术语意味着，介壳虫科成熟的雌体不用与雄体交配就可以产生能育的卵。现在，我们知道有几个纲中的某些动物在早期就具备了正常的生殖能力；我们只要采取渐进的步骤促进单性生殖出现得更早（摇蚊显示的是中间阶段，即蛹的阶段），或许就可以解释瘿蚊的这种奇异情形了。

我在前面已经讲过，在胚胎早期阶段，同一个体的不同部分是完全相似的，但在成虫阶段会变得大不一样，并且出于完全相同的目的。我也曾说过，属于同一纲最不相同的胚胎通常十分相似，但当完全发育后，就会出现很大的差异。对此，冯贝尔曾有过十分明确的陈述，他说："哺乳类、鸟类、蜥蜴类、蛇类，甚至包括龟鳖类在内的胚胎，不论是整体还是各部分的发育方式，在早期阶段都非常相似；事实上，由于它们太相似，以至我们往往只能从大小上区别这些胚胎。我将两种小胚胎浸在酒精里，由于忘记给它们贴上名称标签，因此我现在已经说不清它们到底属于哪一纲了。它们可能是蜥蜴，或是小鸟，又或是哺乳动物。这些动物在头和躯干的形成方面极其相似。然而，这些早期胚胎缺

少四肢。即使发育的最初阶段存在四肢，我们也无法弄清楚它们的准确属性，因为蜥蜴和哺乳类的脚、鸟类的翅膀和脚与人的手和脚类似，都来自同一个基本类型。”在发育的相应阶段，大部分甲壳类的幼虫十分相似，而成虫却会有很大区别；许多动物都是如此。偶尔，胚胎相似性的法则可以持续到很晚还保留痕迹，这样一来，同一属和近似属的鸟类幼体的羽毛常常十分相似；在鸫类的斑点羽毛上，我们可以看到这种现象。在猫族中，大部分物种成年后都具有条纹与斑点。植物中偶尔也存在类似情况，尽管不多见。因此，金雀花的首叶与假叶、金合欢属的首叶都是羽状或分裂状的，和豆科植物的叶子很像。

同一纲中完全不同的动物胚胎在构造上彼此相似，这一特点往往与它们的生存条件没有直接联系。例如，在脊椎动物的胚胎中，鳃裂附近的动脉有一个特殊的弧状构造，我们无法想象这种构造与母体子宫内的幼小哺乳动物、在巢内孵化出的鸟卵、在水中的蛙卵所处的生存条件有什么关系。我们没有理由相信这样的关系，就像我们没有理由相信人类的手、蝙蝠的翅膀、海豚的鳍内相似的骨骼与生存条件相似有关。也没有人会思考，幼小狮子的条纹或幼小黑鸫鸟的斑点对于这些动物来说有什么用途。

可是，当某种动物在胚胎时期的某一阶段是活动的，而且必须为自己寻找食物，那么情形就不一样了。对于生命来说，这样的活动时期可以发生在早期或者晚期；但是无论发生在什么时期，幼体都会像成虫一样，完美地适应生存条件。最近，卢布克爵士已经详细解释了它们的发生过程：分属于完全不同“目”的一些昆虫幼体密切相似，而同一目中各昆虫的幼虫却不相似，这是依据它们的生活习性推测而来的。由于这种适应，近缘动物幼体的相似性有时就会显得模糊不清，特别是在发育的不同阶段出现分工现象时。就像同一幼虫在某一阶段必须寻找食物，另一阶段不得不寻找生活的地方一样。甚至会出现这样的情形：近缘物种或物种群的幼虫之间的差异要比成体的差异大。但是在大部分情况下，活动的幼体仍然或多或少地遵循着胚胎相似的法则，例如蔓足类，就算是名声显赫的居维叶也没有发现藤壶是一种甲壳类；但是，只要研究一下幼虫就会知道，藤壶属于甲壳类。蔓足类的两个主要类别是有柄蔓足类和无柄蔓足类，虽然它们的外表很不相同，但是幼虫的区别却很小。

在发育过程中，胚胎的机体结构也在提高。虽然我知道无法确定机体结构的高级或低级，但还是采用了这个说法。大概没有人会否认蝴蝶比毛虫更高级。但是在某些情况下，成体动物常常被认为比幼虫低级，例如某些寄生的甲壳类。我们再来分析一下蔓足动物：处于第一阶段的幼虫有三对运动器官、一个简单的单眼和一个吻状的嘴，它们依靠这个嘴吃许多食物，因此体积增大了很多。第二阶段，相当于蝴蝶的蛹期，它们有六对构造精致的游泳腿、一对巨大的复眼和一对复杂的触角，但是有一个紧闭的、不完善的嘴，不能吃食物；在这一阶段，它们需要运用发达的感觉器官和游泳能力去寻找一个适宜的地点，以便附着在上面完成最后的变态。完成变态之后，它们便会固定下来生活：腿会转化为把握器官；重新形成一个结构良好的嘴；失去了触角，两只眼也转化为细小的、单独的、简单的眼点。在最后的阶段中，与其幼虫状态相比，蔓足动物的成体既高级又低级，两方面均有体现。但是在某些属中，幼虫可以发育成具有普通构造的雌雄同体，还可以发育成补雄体；后者的发育确实属于退步，因为雄体仅仅是一个能短暂生活的囊，除了生殖器官外，缺少嘴、胃和其他重要器官。

我们已经习惯于看到胚胎与成体构造上的差异，很容易把这种差异看作生长过程中必然会发生的事情。但是我们还不清楚，为什么在这些动物的某些构造（例如蝙蝠的翅膀和海豚的鳍）开始现形时，其他构造并不按适当的比例显现出来。在动物中，某些整群和其他群的部分成员就会发生这种情况，无论什么时期，胚胎与成体的差异不大；欧文曾就乌贼的情况指出，“未经变态，头足类的性状在胚胎早期就显现出来了”。陆栖贝类和淡水甲壳类一出生就具有固有的形状，但是这两个大纲中的海生成员在发育过程中常常要经历巨大的变化。然而，蜘蛛却几乎没有经受任何变态。大部分昆虫的幼虫都会经历蠕虫状阶段，不管它们是积极活动以适应生存条件，还是处于适宜的养料中，又或者是受到亲体的哺育。但是在少数情况下，如果我们看到了赫胥黎教授绘制的昆虫发育图，就无法看见蠕虫状阶段的任何痕迹。

有时，早期的发育阶段不会出现。缪勒发现，某些虾形的甲壳类（与对虾属相似），首先形成的是简单无节幼体，接着经过几次水蚤期，再经过糠虾期，最后才会获得成体构造。在这些甲壳类的庞大软甲

目中，目前还没发现其他成员要先经历无节幼体阶段，尽管许多是以水蚤形态出现的。虽然如此，缪勒还是提出了一些理由支持自己的观点：如果不抑制发育，所有甲壳类都会经历无节幼体阶段。

那么，我们应该怎样解释胚胎学上的这些现象呢？胚胎与成体在构造上存在一般性的差异；同一个体胚胎的各部分在生长早期是相似的，后来会变得不一样，并且有着不同的用途；同一纲中不同种胚胎和幼虫很相似，但也不是一成不变。胚胎在卵或子宫里的时候，常常会保留一些无用的构造；另一方面，幼虫必须为自己提供食物，可以完全适应周围的条件；最后，在机体构造的等级方面，某些幼体要比它们将来发育成的成体高级。我相信，这些现象都可以做如下的解释：

因为畸形会影响胚胎的早期发育，所以人们通常认为，细微变异或个体差异必然出现在同一时期。关于这一点，我们没有什么证据。甚至与此相反的是，我们的证据支持了完全不同的结论。众所周知，在牛、马和其他观赏动物出生后的一些时间里，饲养者无法明确指出这些幼小动物的优缺点。我们在自己的孩子身上也清楚地看到了这一点：我们无法说出某个孩子将来是高还是矮，或者将来一定有什么样的容貌。问题的关键不在于变异发生在什么时期，而在于什么时期能表现出变异的效果来。变异的原因也许出现在生殖作用之前，我们常常猜测作用于亲体的一方或双方。值得注意的是，对于很幼小的动物来说，只要还处于母体子宫或卵内，只要还能获得亲体的营养和保护，它的大部分性状是在生命的早期获得的还是在晚期获得的就都不重要了。例如，对于凭借钩状喙取食的鸟来说，当它幼小的时候，只要有亲体哺育，是否拥有这种形状的喙并不重要。

我曾在第一章中说过，不论一种变异在什么时期出现在生物的亲代身上，这种变异都有可能在相应的时期重新出现在它们后代的身上。某些变异只能出现在相应的时期，例如蚕蛾在幼虫、茧或成体时的各种特性，牛在成熟期时角的特点等。但是就我们所知，最初出现的变异，不论在生命的早期还是晚期，都有可能在后代或亲代的相应时期重新出现。当然，这种情况也不是绝对的，我也可以举出几个例外的事例（就这个术语的广义而言），这些变异在后代中会出现得更早。

我相信下列两个原理可以解释上述胚胎学的主要事实，即轻微变异总是出现在生命不太早的时期，并且在同一时期遗传给后代。首先，我们来看一看家养变种中的一些类似情况。一些仔细研究过狗的作者认为，虽然细腰猎狗与斗牛狗很不相同，实际上却是密切相似的变种，是从同一个野生种遗传下来的；因此，我非常好奇地想知道它们的幼狗存在多大的差异。饲养者告诉我，幼狗之间的差异与亲代之间的差异是一样的。如果凭眼睛判断，这似乎是正确的；但是在实际测量老狗和出生仅有六日的狗崽时，我发现狗崽并没有获得与老狗相同比例差异的全量。人们又告诉我，拉车马和赛马，这些几乎完全在家养条件下经过人工选择形成的品种，其小马之间的差异与大马之间似乎是一样的；但是，经过仔细测量赛马和拉车马的母马以及它们出生仅三日的小马后，我发现了不一样的情况。

许多证据表明，鸽子的品种是从单一的野生种遗传下来的。我认真比较了孵化后12小时以内的雏鸽；仔细测量了野生的亲体种、凸胸鸽、扇尾鸽、侏儒鸽（即西班牙鸽）、巴巴鸽、龙鸽、信鸽、翻飞鸽的喙的比例，嘴的宽度，鼻孔与眼睑的长度，脚的大小和腿的长度。在这些鸽子中，有一些鸽子成熟后在长度、喙的性状等方面变得十分不一样。在自然状态下，它们可能被列为不同的属。然而，当把这几个刚孵出来的雏鸟排成一列时，虽然可以勉强区别开其中的大多数，可是比起成熟的鸟，它们在上述特殊点上的差异却很小；甚至在幼鸟中，某些特点的差异，例如嘴的宽度，几乎无法察觉。不过，也存在一个明显的例外，短脸翻飞鸽的雏鸽就和成鸟具有几乎完全相同的比例，这一点与其他鸽子不同。

上述两个原理解释了这些事实，即饲养者是在狗、马和鸽子等快成熟的时期才会选择它们进行繁育。饲养者们并不关心所需特征是在生命的早期还是晚期获得的，只要成体动物能具有就可以了。刚才所提到的情况，尤其是鸽子的例子，说明经过人工选择积累起来的并赋予生物独有价值的特征，通常不会出现在生命的早期，也不会从同一时期进行遗传。但是，短面翻飞鸽的情况（雏鸽出生12个小时后就具有固定性状）证明了这并不是一条普遍的规律，因为在这里表现出来的特征，要么出现得比一般情况更早一些，要么就是从更早的阶段遗传下来的。

现在，让我们运用这两个原理来分析一下自然状态下的物种。由某些古老类型遗传下来的鸟类的一个群，为了适应不同的生存条件，通过自然选择发生了变化。于是，由于若干物种的许多轻微变异并不是在生命的早期发生的，而是在一个相应的时期进行遗传的，所以幼体一般不会发生变异，并且幼体之间的相似程度也比成鸟更高，就像我们在各种鸽子中看到的一样。这个观点也可以引申到十分不同的构造，甚至整个纲中。例如前肢，古老的祖先曾经把它当作腿使用，经过漫长的演化过程，前肢可能发生了变化，在某一类后代中被当作手使用，或者在另一类后代中当作桨状物使用，又或者在其他类别后代中当作翅膀使用。不过，根据上述两个原理，尽管在每一类型的成体阶段将大为不同，但是在这几个类型的胚胎早期，前肢不会出现大的变化。不管是长期连续使用的器官还是不常使用的器官，主要是在或者只在生物接近成熟而迫使它用全部力量谋生时，才会在改变某一物种的肢体或其他构造方面产生影响。由此产生的影响将在相应接近成熟的时期传递给后代。这样，幼体的各个构造通过增强使用或不使用的效果，将不会发生变化或只发生很轻微的变化。

对于某些动物而言，连续变异可以出现在生命的早期，或者在更早的时期遗传下去，就像短面翻飞鸽那样。在上述情况下，幼体或胚胎都与成熟的亲体密切相似。在某些整群或者亚群中，例如乌贼、陆生贝类、淡水甲壳类、蜘蛛和昆虫纲的一些成员，这是一条发育准则。为什么这些类群的幼体不会经历任何变态？我们认为根本原因可能是幼体不得不在幼年时期自己解决各种需要，并且遵循与亲代一样的生活习性。在这种情况下，它们要以与亲代相同的方式发生变异。为了生存，这是不可缺少的。虽然许多陆生动物和淡水动物不曾经历任何变态，但是同一群内的海生动物却会发生各种变态。对于这一奇特的事实，缪勒曾说，生活在陆地上或淡水中的动物，由于没有经历任何幼虫阶段，缓慢的变化与适应过程将大大地简单化。因为当环境和生活习性发生巨大的改变时，想要找到既适于幼虫阶段又适于成虫阶段，而且没有被其他生物占领的地方，绝对不可能。在这种情况下，成体构造越来越提前，自然选择将偏爱渐进的获得；于是，以前变态的痕迹也就消失了。

另一方面，一种动物幼体所遵循的生活习性与它们的亲体略微不

同，因此构造也会稍有不同。如果这样做对生物有利的话，或者如果一种幼虫继续变化到不同于亲体也是有利的话，按照相应时期的遗传原理，幼体或幼虫将因自然选择而变得与亲体越来越不相同。幼虫阶段的差异也可能变得与连续发育时期相似，因此，第一阶段的幼虫可能与第二阶段有着很大的差别，许多动物就有这种情况。成体也可能变得能够适应那样的环境与习性，即运动器官和感觉器官失去了作用；这样一来，变态就退化了。

根据上述幼体构造的变化与生活习性的变化相一致的原理，以及相应时期的遗传原理，我们可以明白，为什么动物经过的发育阶段与成体发育的原始状态完全不同。大多数权威专家现在都认为，昆虫的各种幼虫期和蛹期就是通过不断适应生存条件而获得的，而不是通过遗传从古老类型那里获得的。芫菁属是一种经过某种异常发育阶段的甲虫，它的奇异情形可以解释其发生的过程。法布尔说，第一批幼虫类型是一种活泼、微小的幼虫，有六条腿、两根长触角和四只眼睛。这些幼虫在蜂巢里孵化；春天时，当雄蜂在雌蜂之前羽化出室后，幼虫便跳到雄蜂的身上，等到雌雄交配时再爬到雌蜂身上。一旦雌蜂将卵产在蜜室上，芫菁属的幼虫就会立刻跳到卵上并且吃掉这些卵。此后，它们会发生很大的变化：眼睛消失了，腿和触角也残缺不全了，并且以蜜为生；此时，它们更像昆虫的普通幼虫。后来，它们会经历更进一步的转化，最终变成完美的甲虫。现在，如果有一种昆虫的转化与芫菁属的变态过程类似，一旦变成新昆虫纲的祖先，那么这个新纲的发育过程就会与现在昆虫的发育过程完全不同；而第一批幼虫阶段肯定无法代表任何成体类型和古老类型以前的状态。

另一方面，许多动物的胚胎阶段或成虫阶段大体上显示了整个类群祖先的成虫状态。在甲壳类这个大纲中包含着彼此完全不同的类型，如寄生虫类、蔓足类、切甲类，甚至软甲类，而它们最初都是以无节幼体出现的。因为这些幼虫生活在宽阔的海洋里，因而不适应任何特殊的生活习性。缪勒推测，很可能在一个很遥远的时期，存在过一种类似无节幼虫的独立成体动物。后来，沿着几条分叉的血统线产生了上述庞大的甲壳类群。此外，根据我们已知的关于哺乳类、鸟类、鱼类和爬行类胚胎的知识，这些动物大概是某些古老祖先的变异后代。这些古老祖先的

成体具有适宜水生生活的鳃、鳔、鳍状肢和长尾等结构。

所有曾经存在过的生物，包括灭绝了的和现存的，能够包含在少数几个大纲里。根据我们的理论，每一纲的所有成员都由细微的分级连接起来。如果我们的采集是完整的，那么依据谱系分类将是最好的、唯一可能的分类方法。在“自然系统”的术语之下，博物学家们使用“血统”在生物之间建立相互联系。根据这个观点可知，在大多数博物学家眼里，相比成体的构造，胚胎的构造对于分类来说更为重要。但是，在两个或更多的动物群里，不管它们的成体构造与生活习性有多大差异，如果都经过相似的胚胎阶段，那么就可以确定它们是从同一个亲体类型遗传下来的，而且有着密切的联系。这种胚胎构造的共同性显现了其血统的共同性。但是胚胎发育的不同无法证明血统的不同，因为对于两个类群的一个群来说，发育阶段有可能被抑制，或者为了适应新的生存条件而发生很大的变化，从而难以辨认。即使成体发生了极端变异的类群，其起源的共同性往往还会从幼虫的构造上显现出来。例如，我们很清楚的是，虽然蔓足类的外表非常像贝类，可是根据它们的幼虫可知，蔓足类是属于甲壳类的，因为胚胎清楚地展现了一个很少变异的古老甲壳类祖先的构造。因此我们可以理解，为什么古老类型的成体状态常常相似于同一纲现存种的胚胎。阿加西斯认为，这是自然界的一条普遍规律；我们以后还会看到，这条规律是真实存在的。不过，只有在下列情况下才能证明这条规律是真实的，即这个群的古老祖先没有发生过连续的变异，而且早期变异在遗传过程中也没有完全消失。我们还必须记住，尽管这条规律是正确的，但是由于地质记录延续的时间还不够久远，因而可能很难得到证实。如果某个古老类型在幼虫时期变得适应于某种特殊的生活方式，而且把同一幼虫状态遗传给了整个群的后代，那么在这种情况下，这条规律也不是严格有效的，因为这样的幼虫将不会与任何古老类型的成体状态相类似。

因此，我认为可以根据变异原理解释这个胚胎学上的重要事实。在一个古老祖先的许多后代中，其变异不会出现在生命很早的时期，但会在相应时期遗传给其后代。我们可以将胚胎看作一幅图画，虽然有些模糊，但是可以从中看出同一纲里所有成员的祖先形态，或许是它的成体状态，或许是它的幼体状态。这样看来，胚胎学变得更加有趣了。

退化的、萎缩的和停止发育的器官

这些奇特的器官和构造常常具有明显不同的特征。在整个自然界中，它们是极其常见的，甚至是普遍的。要想举出一种不具退化结构或残留痕迹的高级动物，是不可能的。例如，哺乳动物的雄体具有退化的乳头；蛇类的肺有一叶是残缺不全的；鸟类的“庶出翼”可以被看作发育不全的趾，而且有些物种的整个翅膀都是残缺不全的，无法用作飞翔；更奇特的是，鲸的胎儿具有牙齿，而长大以后却没有牙齿；尚未出生的小牛的上颌有牙齿，但从来不会穿出牙龈。

残迹器官以各种方式显示它们的起源意义。近缘物种或者同一种内的甲虫，有的具有大且完全的翅，有的只具有残迹的膜，位于粘合起来的翅鞘之下。遇到这种情况，我们就不能不怀疑这种残迹是表示翅膀的。有时，残迹器官还保留着它们的潜在能力：有些雄性哺乳类的乳头发育得很好，而且能分泌乳汁。牛属的乳房就是这样，它在正常情况下有四个发育的乳头和两个残迹的乳头；有时，家养奶牛的残迹乳头发育显著，而且能够产奶。对于植物来说，同一物种的个体的花瓣有时是残缺的，有时却发育得很完全。在雌雄异花的某些植物中，凯洛伊德发现，让具有残迹雌蕊的雄花物种与具有发育雌蕊的雌雄同花物种杂交，其杂种后代能明显表现出残迹雌蕊。这一点清楚地表明，残迹雌蕊与完全雌蕊在自然界基本上是非常相似的。从某种意义上来说，一种动物在完全状态中的构造可能是残迹，因为它是无用的。刘易斯先生说过：普通蝾螈即水蝾螈的蝌蚪，有鳃，生活在水中；但是山蝾螈则生活在高山上，产出发育完全的幼体。这种动物从来不在水中生活，可是如果将一个怀胎的雌体剖开就会发现，里面的蝌蚪具有精致的羽状鳃；如果将这些蝌蚪放入水中，它们就会像水蝾螈的蝌蚪一样在水中游来游去。很显然，这种水生的体质与动物未来的生活没有关系，也不是在适应胚胎条件；它只与祖先过去的适应有关系，体现了它的祖先发育过程中的某个阶段而已。

兼有两种用途的器官，对于其中一种较重要的用途可能变为残迹或完全不发育，而对于另一种用途却完全有效。例如，植物雌蕊的功用在于使花粉管能达到子房里的胚珠。雌蕊是由花柱支撑的柱头组成的。但

是在某些聚合花科的植物中，不能授精的雄性小花没有柱头，只有残迹的雌蕊。不过，其花柱仍然很发达，并且生有细毛，用来刷掉周围的和邻区的花药。还有一种器官可以使原来的用途变为残迹，并且用于另一目的：在一些鱼类中，鳔的漂浮功能变成残迹，转变成原始的呼吸器官或肺了。还有很多类似的实例。

有用的器官，不论它发育得多么不完全，也不能被看作残迹，除非我们有理由相信它们曾经高度发达过。它们可能处于一种初生的状态，正在逐渐变得完善。另一方面，残迹器官或许毫无用途，例如从来不会穿透牙龈的牙齿；或许几乎没有用处，例如鸵鸟的翅膀，仅能作为风篷使用。这种情况下的器官，在从前发育更差时甚至比今天的用处更小，因此它们不可能是通过变异和自然选择产生的。自然选择的作用只在于保留有利的变异。在遗传的力量下，它们部分被保留下来，并且与生物以前的状态有所关联。但是，要区别残迹器官与初生器官常常是很困难的。因为我们只能用类推的方法来判断一种器官是否可以变得更发达。只有在它们能进一步发达的情况下，才能被认定为初生器官。可是，这种状态的器官通常很少出现，因为拥有这种器官的生物常常会遭到拥有更完善的同样器官后继者的排挤，所以早已灭绝。企鹅的翅膀有着很重要的用途，可以当鳍用；虽然它可能代表了翅膀的初生状态，但是我并不认同这个观点，因为企鹅的翅膀更可能是一种缩小了的器官，只是为了适应新的功能而发生了变异。另一方面，几维鸟（或称无翼鸟）的翅膀完全是无用的，绝对是残迹器官。欧文认为，肺鱼的简单丝状肢是“高级脊椎动物获得充分功能性发展的器官的起点”。但是根据昆特博士提出的观点，肺鱼的简单丝状肢很可能是由坚固的鳍轴组成的残迹，这个鳍轴拥有不发达的鳍条和侧枝。如果将鸭嘴兽的乳腺与黄牛的乳房相比较，可以看作是初生状态的。某些蔓足类的卵带已不能作为卵的附着物，很不发达，代表了初生状态的鳃。

同一物种的个体中，残迹器官的发育程度很容易发生变异。在近缘物种中，同一器官的缩小程度偶尔也会出现很大的差异。对此，同一科中雌蛾的翅膀状态就是很好的例证。残迹器官可以完全停止发育，这意味着在某些动物或植物中，有些器官已经彻底缺失了，依据类推原理或许可以找到它们，而且在畸形个体中偶尔也能够发现它们。在玄参科的

大多数植物中，第五条雄蕊已经完全萎缩；不过我们可以推测，第五条雄蕊以前确实存在过，因为我们在该科许多物种中都可以找到它的残迹物，而且这种残迹物有时还会完全发育，就像我们有时在普通的金鱼草中看到的情况一样。在研究同一纲不同成员的各种构造的同源性时，常常可以发现残迹物。为了充分理解各器官的关系，残迹物是最有用的。欧文所绘制的马、牛和犀牛腿骨的插图就充分证实了这一点。

残迹器官，例如鲸和反刍类上颚的牙齿在胚胎中常常可以见到，但是会逐渐消失，这是一个非常重要的事实。我相信这也是一条普遍的规律，即相比较相邻器官而言，残迹器官在胚胎中比在成体中要大一些；因此，这种生命早期的器官很少残迹，甚至几乎没有残迹。而成体的残迹器官常常被认为是保留了它们的胚胎状态。

我在上文中列举的都是关于残迹器官的主要事实。回想这些事实，我们都会感到十分惊异；因为同样的推论告诉我们，大多数器官是如何巧妙地适应了某些目的，并且残迹器官和萎缩器官是不完全的、无用的。在博物学家的著作中，常常将残迹器官的形成看作“为了对称的缘故”，或者是“为了完成自然的设计”而创造出来的。但是，这并不能算作一种解释，只是在陈述事实。这样的说法本身就是矛盾的，例如，王蛇拥有后肢与骨盆的残迹物，假如这些骨骼的保留是为了完成“自然的设计”，那么正如魏斯曼教授所质疑的，为什么其他的蛇不保留这些骨骼，甚至连这些骨骼的残迹都没有呢？如果认为卫星为了“对称的缘故”沿着椭圆形轨道围绕着它们的行星运行，而行星同样围绕着太阳运行，那么对于坚持这种主张的天文学者来说，他们又做何感想呢？一位著名的生理学者猜测，残迹器官的存在是为了排泄剩余物质或者对系统有害的物质。但是，我们可以想象一下微小的乳头，它相当于雄花中的雌蕊，仅由细胞组织构成，它能起到这样的作用吗？我们可以再想象一下，将要消失的残迹牙齿失去磷酸钙这样的重要物质后，对于迅速生长的牛胚胎来说还是有益的吗？当人的手指被切割之后，断指上会出现不完全的指甲，我们立刻就会明白，指甲痕迹的发育是为了排除角质物质。那么依此类推，海牛鳍上的残迹指甲应该也是出于相同的原因而发育的。

根据血统与变异的说法可知，残迹器官的起源是比较容易解释的，我们能够在很大程度上理解支配它们发育的不完全的原因。在家养生物

中，存在很多残迹器官的例子，例如无尾种类中尾巴的残迹、无耳绵羊品种中耳朵的残迹、无角牛的品种等。尤亚特发现，小牛的下垂小角会重新出现，花椰菜整个花的状态也很特别。我们常常会看到畸形动物中各个构造的残迹物，但是，我认为这种情况除了能说明残迹器官的存在外，并不能说明残迹器官在自然状态下的成因。许多证据表明，自然状态下的物种并没有经受巨大的、突然的变化。我们通过研究家养动物得知，不使用导致了部分器官逐渐萎缩；而且，这种结果是可以遗传的。

不使用大概是器官衰退的主要原因。首先，器官会缓慢地缩小，直至最后变成残迹器官，例如栖息在暗洞里的动物的眼睛、栖息在海岛上的鸟的翅膀。后者由于岛上没有猛兽追击迫使它们飞行，最后竟然丧失了飞翔的能力。又如有些器官在某些情况下是有利的，而在另外一些情况下却变成了有害的，例如生活在开阔小岛上甲壳虫的翅膀；在这种情况下，自然选择会帮助这种器官缩小，直至成为无害而残留的器官。

构造上和功能上积累而成的任何变化，都是在自然选择的作用下形成的。因此，一种器官由于生活习性的改变而变得无用或者有害时，其用途也会发生改变。一种器官也可能因为它以前的某种功能而被保留下来。当原来有用的器官变得无用时，或许会发生许多变异，因为它们的变异已不再受自然选择的抑制了。所有这些都与我们在自然界所观察到的情况完全一致。此外，不论生活在哪一时期，一种器官是废弃还是缩小，一般都发生在生物的成熟时期，因为这有利于发挥它的全部活力；相应时期的遗传原理有另一种倾向，使缩小的器官在同一时期重新出现。但是，这一原理将很难影响处于胚胎状态的器官。因此，我们能够理解为什么残迹器官在胚胎期内比相邻器官要大一些，而在成体阶段要比相邻器官小一些。例如，一种成体动物的指头在世代遗传中由于习性的变化而使用得越来越少。如果一种器官或腺体在功能上使用得越来越少，那么我们可以推论，它们在这个动物的成体后代上就会缩小，但是在胚胎中仍保持原始的发育程度。

但是，仍然存在无法解释的难点。当一种器官停止使用后，它是如何一步步缩小，只剩下一点残迹，甚至完全消失的呢？一旦器官在机能上变得无用，它就很难产生任何进一步的影响。这里需要某些附加的解释，但我现在还不能提出。然而，如果能够证明生物体各部分更倾向朝

增大方面变异，而非缩小方面变异，那么我们便能理解，已经无用的器官为什么还受“不使用”的影响变成残迹，直至完全消失，这是因为向着缩小方面的变异将不再受自然选择的抑制。在上一章里，我们讨论过生长的经济学原理。根据这个原理，如果任何部分的物质对于所有者是没有用处的，就会尽可能地被省略。也许这对于解释无用部分变成残迹是有帮助；但是，这一原理几乎只能局限于缩小过程的较早阶段。我们无法想象，在雄花中代表雌花雌蕊且只能形成细胞组织级的一种微小乳突，为了节省原料能够进一步缩小或消失。

最后值得指出的是，无论残迹器官是如何退化到现在这样的无用状态的，它们都是生物先前状态的记录。并且，它们完全是由遗传的力量保留下来的。我们根据系统分类的观点可知，为什么分类学者把生物放在自然系统中的适当地位时常会发现残迹器官与生理上极为重要的器官有相同的用处，甚至有更大的价值。残迹器官类似于英文单词中的某些字母，尽管这个字母在单词的拼法上还保留着，但已不发音，只是还可以用作指示单词来源的线索。根据变异的血统观点，我们可以断定，对于生物特创论来说，残迹的、不完全的、无用的或者完全消失的器官的存在必然是一个难以解决的问题。但是对本书阐明的学术观点而言，这种情况在预料之中，并不是什么难点。

摘要

我在本章里想要说明的是，所有时期的所有生物都可以排列成大大小小的谱系；所有现存或灭绝了的生物，被复杂的、辐射状的、曲折的亲缘线连接在少数大纲中；博物学家在分类中应遵循的原则和遇到的困难；性状的价值在于其稳定性和普遍性，而不在于生理上的重要性，不管它们是非常重要的或较不重要的，还是像残迹器官那样毫不重要的；同功的即适应的性状与具有真正亲缘关系的性状之间在分类价值上的对立性；以及其他相关法则。如果我们承认同源类型有共同的祖先，它们通过变异和自然选择而发生变化，从而引起灭绝和性状分歧，那么上述内容就很容易理解了。在考虑这种观点时必须注意，血统因素曾经被普遍使用，将不同性别、年龄、两性的类型以及同种中的变种都划分到了一起，而不考虑它们构造上的差异。如果我们把血统因素——生物相似

的内在因素——进行拓展，就能理解什么是“自然系统”：自然系统就是按谱系进行排列，通过变种、物种、属、科、目、纲等术语来表示它们获得差异的程度。

按照血统与变异的观点，“形态学”上的许多重大事实就都可以理解了。无论我们观察同一纲的不同物种在同源器官中所表现出的同一模式，还是观察同一个体动物和个体植物的系列同源，都可以得到解释。

按照连续的、微小的变异一般不会发生在生命周期的早期，并且会遗传至相应时期的原理，我们可以理解“胚胎学”中的主要事实，即在成熟期其构造和功能存在巨大差异的同源器官在胚胎中是非常相似的。在相近而有着显著差别的物种中，同源构造或器官在胚胎中是相似的，尽管它们在成体阶段为了适应不同的习性而有着不同的功能。幼虫是活动的胚胎，由于生活习性的关系，它们或多或少地发生了特殊的变化，并且把这种变化遗传到相应的时期。我们根据同样的原理可知，当器官由于萎缩或通过自然选择作用而缩小时，一般发生在生物必须解决自己生活需求的时期。我们还应该记住，遗传的力量是十分强大的，因此残迹器官的产生就是预料之中的事了。根据自然分类必须按照谱系的观点，胚胎性状和残迹器官在分类上的重要性就完全可以理解了。

最后，本章所提到的若干事实清楚地表明，生活在这个世界上的无数物种、属和科，在其各自的纲或群的范围内都是从共同祖先遗传下来的，并且都在生物发展的进程中发生了变异。即使暂时没有其他事实或证据，我也相信这个观点是正确的。

第十五章：综述和结论

由于本书的内容中一直在争论各种观点和学说，有必要将书中主要的事实和推论在此进行概要的综述，以便读者阅读。

我不否认，通过变异和自然选择产生优良后代这一理论可能会遭到严厉的批判和反驳，我也努力试图让这些反对意见充分地发挥作用。乍看起来，似乎没有比下述论点更难以让人相信的了，即那些较为复杂的器官和生物本能的完善，并不是通过类似于人类理性的方式或超越于这种理性的方式，而是通过对生物个体有益的无数微小变异的不断积累而完成的。尽管如此，这一难题在我们的想象中仍然是无法克服的。但是如果我们认同以下的命题，它也就可以迎刃而解了。这些命题是：生物体的各个部分和生物本能存在着个体差异，而生存斗争使得生物体构造或生物本能中的有利变异得以保留下来，级进的阶元伴随着每个器官的完善化过程，并且每个阶元都越来越完善。这些命题的正确性，我看是无法否定的。

许多生物构造是通过什么样的中间级进阶元变得完善的？这是很难推测的，尤其是对于那些已经大规模灭绝的、不连续的、衰退的生物类群来说，更是如此。但是，自然界中存在那么多奇异的过渡阶元，因此当我们说某种器官或生物本能，或者任何一个完整的生物构造无法通过许多级进的步骤达到现有状态时，态度必须十分谨慎。我们必须承认，自然选择学说遇到了一些困难，其中最奇怪的一点是，同一群中共存着两三种工蚁或不育雌蚁，且等级明显。但是，我已经在寻找解决这些问题的办法。

物种在初次杂交过程中存在普遍的不育性，而变种在杂交过程中存在普遍的可育性，这两者之间形成了十分鲜明的对比。关于这一点，敬请读者翻阅本书第九章结尾的论述。我认为，与两种不同的树木不能嫁接在一起一样，这些事实不存在任何特殊性，而只是杂交物种之间生殖系统的偶然差异造成的。这一结论的正确性可以通过两个相同物种互交

时（即一个物种先用作父本，后又用作母本）所产生的巨大差异而得到证实。对那些具有两三个世代的植物进行对比研究，可以更容易地得出上述结论。因为当不同世代两个类型的异性相互交配时，它们很少产生或甚至不产生种子，而且其后代也或多或少地无法生育。毋庸置疑的是，这些不同世代的类型属于同一物种，它们相互之间除了生殖器官和生殖功能不同外，没有其他区别。

虽然在许多作者看来，变种杂交及其杂交后的混种后代是普遍可育的，但是自从权威学者盖特纳和凯洛依德列举了一些事例后，这种观点就受到了质疑。用作实验的变种大多数是驯养条件下的产物，而且驯养（不单指圈养）总是具有消除不育性的倾向。同样的道理，当杂交时，这种不育性会影响亲种；因此，我们无法指望驯养会导致其变异后代出现杂交不育的情况。显而易见，这种不育性的消除与人们在不同环境条件下促使驯养的动物自由繁殖的原因相似，也与它们已经逐步适应其不断变化的生活环境有关。

对于物种初次杂交的不育性及其杂交后代不育性，两组相同的事实似乎较好地给出了解释。一方面，我们有理由相信，生存条件的细微变化会给所有生物带来活力，并增强其繁殖能力；另一方面，同一变种不同个体的交配及不同变种之间的交配会促使其后代数量的增加，并且会使后代的个体增大、活力增强，这主要是由交配者处于不同的生活环境造成的。我曾经做过许多实验，结果表明，如果同一物种的所有个体在相同的生存条件下生活几代之后，其在杂交过程中获得的优势将大大减少，甚至会彻底消失。另一方面，当对曾经长期生活在几乎相同条件下的物种进行圈养时，由于外界环境条件发生了很大的改变，它们要么面临死亡，要么即使能够健康地存活下来也会失去生育能力。然而，由于驯养的生物长期处于变动的环境中，一般不会发生上述情形。我们发现，两个不同物种的杂交后代，在受孕后不久或者在幼年期就会夭折；即使存活下来，也会或多或少丧失生殖能力，导致数量减少。出现这种情况，可能是由于两个杂交物种的环境条件发生了巨大的变化。如果能够确切地解释：大象或狐狸等动物在本土圈养也无法生育，而猪狗之类的家畜，即使生存条件发生了巨变，也可以自由地繁殖，那么，就可以很明确地解答下列问题：为什么两个不同物种，包括它们的杂交后代在

交配时，常常会丧失部分生殖能力；而两个驯养变种极其混种后代在交配后却是完全能育的。

遗传变异理论在地理分布上面临着严峻的挑战。同一物种的所有个体，以及同一属的所有物种，乃至更高一级的分类阶元，都来源于共同的祖先。因此，可以在世界的任何偏远角落发现它们的踪迹，它们必然是在生生不息的代代相传中从最初的某个地方向全球扩散的。至于这个迁徙的过程是怎样完成的，人们很难推测出来。然而，有证据表明有些物种在很长的时间里（长得难以用年来计算）仍能保持原有形态，由此看来，其偶然的广泛分布并非一件难以理解的事。因为在这段漫长的时间里，这些物种总是可以找到合适的机会，运用各种方式迁移到更远的地方。关于生物分布的不连续或中断的现象，可以用物种在中间地带的灭绝来解释。目前，人们对于晚近时期地球各种气候变化和地理变化影响的广度和深度仍然一无所知，然而这种变化往往有利于生物的迁移。我曾经试图证明，冰期对于同一物种或近似物种在全球的分布产生了多么重要的影响。然而直至今日，人们仍没弄清楚物种偶然迁移的各种方式。至于为什么同一属内的不同物种能够生活在相隔如此遥远的地区，这是因为变异的过程非常缓慢，而在这一漫长的时间内，任何迁移的方式都可能出现并造成同属物种的广泛分布现象。

以自然选择学说来看，以前一定存在着无数个中间类型，它们以类似于现存变种这样的阶元将每个类群中的所有物种连接在一起。可能有些人会产生疑问：为什么在我们的周围没有发现这些连接类型呢？为什么所有生物没有混合在一起而无法分辨呢？关于现在的类型，除极少数情况外，我们不可能找到它们之间的直接过渡类型；而这些过渡类型，必须在已经灭绝的或已经被排挤掉的类型中去寻找。即使在一个长期连续的广大地域，其气候和其他生存条件处于被一个物种所占据向被另一近缘物种所占据的过渡阶段，也无法在其中间地带找到相应的中间变种。其实我们可以这样理解，一个属中的极少量物种发生了变异，而其他物种已经完全灭绝且没有留下变异的后代。即使是那些的确变异了的物种，也只有极少数会在同时同地出现变化，而且这一变异过程十分缓慢。我曾明确指出，中间物种可能最初存在于中间地带，但由于两侧地带的物种数量较大，其变异和进化的速度往往会超过数目较少的中间变

种，因此，中间变种将会被排挤并走向灭绝。

传统观点认为，现存生物和灭绝生物之间，各个连续地质时期灭绝物种和更古老的物种之间，存在着无数已经灭绝的过渡类型。然而，根据这个观点，为什么在各段地层沉积中没有发现这些过渡类型呢？为什么每次采集的化石标本没有生物类型级进变化的明显证据呢？尽管地质研究发现了一些过渡类型，从而使得许多生物的亲缘关系更近了，但是我们仍然没有找到现存物种与过去物种之间应该存在的无数级进微细阶元，而这正好是我的学说需要解释的。正是基于这一点，有些人反对我的学说。此外，为什么整群的近似物种会相继突然地出现在地质历史中？尽管这种突然性常常是一种假象。我们知道，远在寒武纪最底地层沉积之前，生物就已经存在了。但奇怪的是，为什么在寒武纪之前的大套地层中并没有发现寒武纪化石的祖先呢？因为根据这一理论，这样的地层肯定在某一遥远而尚未弄清楚的历史时期就已经在某个地方沉积了。

我只能用地质记录的不完整性来解释这些问题和疑问。如果将博物馆内收藏的所有化石标本的数量与世世代代生活在地球上的无数物种相比，简直是微不足道。任何两个或者多个物种的祖先类型，不可能在所有性状上都直接介于变异的后代之间。就像岩鸽的嗉囊和尾巴的性状，并不处于其变异后代球胸鸽和扇尾鸽之间。即使我们已经进行了认真的研究，在没有找到大多数中间过渡类型之前，也无法确认一个物种是否是另一物种或另一变异物种的祖先。而且，由于地质记录的不完整性，我们也无法找到这么多的过渡类型。即使发现了两三个甚至更多的过渡类型，许多博物学家也会简单地将它们划归为新物种。尤其是当这些过渡类型来自不同的地质时期，即使差异非常微小，也会被定义为新物种。现存的大量可疑类型或许都是变种，但是谁又敢断定人们将来不会发现数量众多的化石过渡类型，从而帮助博物学家们确认哪些可疑的类型是变种呢？人们目前仅对世界上的一部分地区做过地质勘查，只有某些纲中的生物可以较好地保留下来。许多物种自从形成后就没有发生过变化，随后便灭绝了，没有留下变异的后代。虽然物种发生变异的时间很长，但与物种保持某一形态不变的时间相比，却要短得多。最容易发生变异的是优势种和广域种，变异非常显著，而且变异也仅仅出现在局

部地区。由于上述两个原因，很难在某个地层中找到中间过渡类型。只有当变异和进化达到一定程度后，地方性变种才会向远处扩散。当它们扩散并在某个地层中被发现时，看起来像是被突然创造出来似的，就被简单地定义为新物种。大多数地层在沉积过程中常会出现间断，它们延续的时间较物种类型的平均延续时间要短。在许多情况下，较长时间的沉积间断常常被连续的地层沉积分割，因而通常只有在海底上有较多沉积物的沉积时，富含化石的地质层的厚度才足以抵消后来的侵蚀作用而积聚下来。在水平面上升和静止的交替时期，地质记录常常是空白的。在上升期，生物类型可能有较多的变异性；而在沉降期，则有较多的物种灭绝。

至于寒武纪地层之下缺乏富含化石的沉积层，我只能用第十章中提出的假说来解释，即虽然在很长一段时间内，大陆和海洋的相对位置几乎没有发生变化，但我们不能认为它们永远不会变化。因此，比现在所知道的更古老的地层可能已经淹没在大洋中了。威廉·汤普森爵士曾提出一个观点：地球自凝固以来所经历的时间，尚不足以实现我们所推测的生物演化量。对此，我的想法是：第一，我们并不知道应该如何计算生物物种的年变化速率；第二，许多哲学家至今仍不愿承认，我们对于宇宙的构成及地球内部的认识还很肤浅，无法准确推断地球所经历的历史演变。

大家都认可地质记录的不完整性，但是很少有人同意不完整的程度达到了我的学说所要求的程度。如果从一个很长的时间尺度来考量，地质学也表明所有物种都发生过变化，而且它们的变化是采用一种缓慢而渐进的方式进行的，这与我的学说是一致的。我们可以清楚地看到，相较于那些在时间上相隔很远的地层中的化石遗骸之间的关系，连续地层中的化石遗骸之间的关系更密切。

上面的内容是我的学说遇到的几个主要难题和异议，对此，我已经给出了解释和答复。许多年来，这些难题一直困扰着我。但有一点需要我们注意的是，那些重要的意见与我们所知甚少的问题有关，而且我们甚至不清楚还有多少东西是我们不了解的。我们不清楚最简单的器官和最复杂的器官之间存在着多少过渡类型，也不清楚生物在漫长的地质历程中的传播方式，更不清楚地质记录的不完整程度到底是多少。然而，

尽管反对者的说法非常尖锐，但还不足以推翻遗传变异理论。

现在，我们来看争论的另一面。在圈养的情况下，我们看到许多变异是由生存条件的改变引起的，或至少是被生存条件的改变激发的。但是，由于情况不明确，我们很自然地认为这种变异是自发的。变异受许多复杂规律的支配，例如相关生长律、补偿律，还有某些器官的使用频率以及周围环境条件的作用等。虽然驯养生物的变异量很难确定，但是可以确定的是这一变异量非常大。而且，这种变异还可以长久地遗传下去。如果其周围的环境不发生变化，某种已经遗传了许多世代的变异就会持续不断地遗传下去。有证据表明，在驯养条件下，变异一旦发生，将在很长一段时间内持续下去。最古老的驯养生物中也会偶尔产生新变种。

事实上，变异并不是人为造成的，人们只是在无意间把生物放到了新的生存条件之下。于是，自然就对生物组织发挥作用，引起了生物的变异。但是，人们能够选择并且确实选择了自然给予生物的变异，并使其按照某种人们需要的方式积累起来。这样一来，便会使动植物适合人类的爱好或需求。人们可能是有计划地这样做，也可能是无意识地将那些有用的或合乎爱好的个体保留下来，但并不想改变它的品种。显然，经过这样几个世代的连续选择，除了经验丰富、训练有素的人外，普通人很难区分有着微小差异的个体，但这些微小差异对一个品种的性状会产生很大的影响。这种无意识的选择过程在形成最为特殊且最有用的驯养品种中曾有着重要的作用。在很大程度上，人们培育出来的品种与自然物种性状相同，这可以表现在人们很难认清许多品种究竟是变种还是不同物种。

在驯养条件下有着重要作用的原理，在自然条件下也能发挥作用。只有个体或种族具有优势，才能在生存竞争中得以生存。在这里，我们见到了一种强有力的、不断发生作用的选择形式。所有生物都在按几何级数快速增加，不可避免地引起生存竞争。这种快速的增长率可以用简单的计算来证明，在适宜的季节或者在新地区归化时，许多动物和植物的数量都会迅速增加。生物出生的数量比可能存活的数量要多，自然条件的细微差异会影响哪个个体可以存活下去、哪个个体将会死亡；哪个变种或物种的数量会增加，哪个的数量会减少，甚至死亡。综合来看，

同种中不同个体之间的关系最为密切，它们之间的竞争也最激烈、最残酷，其次就是同属的不同物种之间的竞争。另一方面，自然阶元中相距较远的生物之间的竞争也颇为残酷。对于某些个体来说，无论它处在哪个年龄段或哪个季节，只要比竞争者多一点优势，哪怕是十分微弱的优势，或者能够较好地适应周围的自然条件，在竞争中获得胜利的概率就会大一些。

对于雌雄异体的动物来说，常常会发生雄性为了争夺雌性而引发的竞争。最强壮的雄性或者最能成功适应环境的雄性，往往会留下更多的后代。但是雄性动物是否拥有特殊的武器、较好的防御手段等，则是成功的关键因素。只要具有微弱的优势，便会更容易走向成功。

地质学清楚地表明，各个大陆都曾经历过巨大的变迁。因此，我们有希望在自然条件下看到生物的变异，如同它们在驯养情况下所发生的那样。只要在自然状况下发生了变异，自然选择就会发挥作用。有人认为，自然条件下发生的变异仅局限在一个很小的范围，这个说法是无法证实的。虽然只是作用于外部性状，并且很难确定其结果，但是人们却可以将驯养生物个体的微小差异逐渐积累起来，并在短时间内产生显著的效果。大家都知道，物种中存在个体差异，但是除了这些个体差异外，博物学家认为还存在自然变种。它们之间的差别非常明显，值得在分类学著作中记上一笔。没有人能明确区分个体差异和微小变异，也没有人能区分特征明显的变种和亚种以及亚种和物种。在分离的大陆上或者同一大陆被障碍物隔开的不同区域以及孤立的岛屿上，生存着各种多样的生物类型，它们被某些有经验的博物学家列为变种，或者被另一些博物学家则列为地理种或亚种，又或者被列为亲缘很近、特征明显的物种。

如果动植物的确发生了变异，无论是多么微小或缓慢的变异，只要其有利于个体自身的发展，自然选择就会将其保存并积累起来，这正好符合适者生存的法则。如果人们能够耐心地选择有利的变异，那么在不断变化的生存条件下，为什么那些有利于自然界生物的变异不会经常出现并得到保留或选择呢？那些在漫长的时间起作用，并决定每一个生物体质、构造和生活习性的选择力量——即优胜劣汰的力量，会受到什么限制呢？依我看来，没有东西可以限制这种缓慢、巧妙地促使每一种生

物类型适应复杂生存条件的力量。仅仅凭借这一点，自然选择学说的可信度就很高。我已经尽可能忠实地介绍了反对我的学说的种种质疑和意见，接下来我将讨论一下支持这一学说的各种事实和论点。

物种是特征显著而稳定的变种，每个物种开始时都是变种。根据这种说法，我们很难在物种与变种之间划出一条明确的界限。我们很清楚，为什么某个地区已经产生了可以归入同一属的许多物种，并且这些物种至今很繁盛，但是还会有那么多的变种。根据一般的规律，可以确信这种作用仍在物种形成很活跃的地方继续发挥作用。当变种是初期物种时，情况也是一样的。另外，为了在某种程度上保留变种的性状，大属内的物种就需要产生大量的变种或初期物种，因为与小属内的物种相比，大属内的物种之间的差异更小一些。很显然，大属内亲缘关系密切的物种在分布上存在明显的限制，它们根据亲缘关系围绕着其他物种聚集成许多小群体，这两点与变种的特征相似。如果每个物种都是独立创造出来的，那么就无法理解上述关系了；但是如果认为每个物种起初是以变种的形式存在的话，那么就容易理解上述关系了。

由于每个物种都有按照几何级数增长的趋势，而且各个物种中的变异后代可以通过其习性及构造的多样化占据不同的自然领域，以便满足数量不断增加的需要，因此，自然选择更倾向于保留物种中的歧异后代。这样一来，在长期连续的变异过程中，同一物种不同变种之间的细微差异逐渐增大，并形成同一属内不同物种之间较大的差异。新变种必将取代旧变种，并使其灭绝；这样在很大程度上，物种就成为确定的、界限分明的自然群体了。在每个纲中，凡属于较大种群中的优势物种，更容易产生新的优势类型，使得每个大的种群的规模不断增大，性状分异也更大。受限于地球上的生存空间，不可能所有种群都扩大规模，优势类型必然在竞争中打败不占优势的类型，这就促使大类群不断扩大规模，并且性状分异更明显，由此不可避免地引发大量物种的灭绝。这就可以解释为什么只有极少数大纲在生存竞争中始终占据优势地位，而所有的生物类型都可以排列成大小不一的次一级生物群。按照特创论的观点，所有生物在自然系统下可以划归为大小不等的类群这一重大事实是解释不通的。

自然选择只是通过积累微小且连续的有益变异而产生作用，不会导

致巨大的突变，只能以缓慢的步骤进行。因此，“自然界中没有飞跃”这一格言也是符合自然选择学说的。我们可以发现，自然界生物可以通过无穷无尽的方式来达到一个共同的目的，原因就在于每一种特性一旦获得，就可永久地遗传下去。通过不同方式变异了的构造必须符合一个相同的目的。总的来说，自然界很难出现重大革新，但是容易出现微小的变异。如果认为每个物种都是独立创造出来的，那么这种现象如何构成了自然界的一条法则就无法解释了。

上述理论还可以解释许多其他的事实。有一些十分奇怪的现象：一种类似啄木鸟的鸟却在地面上捕食昆虫；高地上的鹅拥有蹼状脚，但是却很少或根本不会游泳；一种类似鸫的鸟能潜水并捕食水生昆虫；一种海燕具有海雀的生活习性和构造……这种例子还有很多。每个物种总是力求扩大自己的规模，而且自然选择总是要求变异后代努力适应自然界中未被占据或尚未被占尽的地盘。根据这种观点，上述现象就是意料之中的了。

在某种程度上，我们可以理解为什么自然界到处都是美，很大一部分原因在于自然选择。就人类的感观而言，美并不是无处不在的，例如某些毒蛇、鱼类或者某些丑陋的蝙蝠。性选择赋予雄性最鲜艳的色泽、优美的体态和其他华丽的装饰。有时在许多鸟类、蝴蝶和别的动物中，雌雄两性都是如此。以鸟类为例，性选择使得雄鸟的鸣叫声不仅取悦了雌鸟，也给人类带来一种莫大的享受。因为有了绿叶的衬托，所以花和果实的色彩更加艳丽、醒目，也更容易被昆虫发现，有利于花粉和种子的传播。为什么某些颜色、声音和形态能给人及动物带来愉悦呢？换句话说，最简单的美感最初是如何获得的呢？这些问题很难回答，就如同某种气味最初是怎样让人感觉舒适一样难以解释。

自然选择的表现是生存竞争，它使各个地区的生物都得到适应与进化，但是这个说法仅仅针对同一时期同一地区的生物关系。虽然一般说来，某一地区的物种是为这个地区独创的，并且特别适合于这个地区，但是会被从其他地区迁移来的、驯化的物种打败和排挤。对此，我们不必感到惊奇。自然界的一切设计并不是绝对完美无缺的，我们的眼睛也不例外。或许某些构造不合情理，我们也无须惊讶。为了抵御外敌，蜜蜂会英勇献身；大量雄蜂的产生，只是为了交配，交配结束后，雄蜂便

会被雌蜂杀死；蜂后对于其能生育的女儿们有着本能的仇视；姬蜂在毛虫体内求食……诸如此类的例子都不足为奇。根据自然选择学说，真正令人感到奇怪的是没能发现更多完美的例子。

我们就此判断，控制变种产生的复杂且不明确的规律，和控制物种产生的规律是相同的。在这两种情况下，自然条件似乎发挥了直接且确定的作用，但这种作用的影响究竟有多大，很难说清楚。于是，当变种进入一个新的地区后，它们有时可以获得该地区物种固有的某些性状。某些器官的使用与废弃，都会对物种和变种产生影响，下列情形可以证实这一结论：和家鸭一样，大头鸭有着不能飞翔的翅膀；一种穴居的栉鼠，有时眼睛是瞎的，而某些鼹鼠大部分是瞎子，眼睛被皮肤遮盖着；栖息在美洲和欧洲黑暗洞穴中的许多动物也常常是瞎的。相关变异在变种和物种中似乎都起着重要的作用，当身体的某一部分产生变异时，其他部分也随之发生改变。有时，返祖现象会在变种和物种中出现。马属内的某些物种及其杂交变种，有时会在肩部和腿部出现斑纹，这是特创论无法解释的现象。但是如果我们相信这些物种都是由其具斑纹的祖先延续下来的，如同许多家鸽品种来源于具条纹的蓝色岩鸽那样，那么上述现象便很容易解释了。

为什么同一属中不同物种之间得以区别的独特特征比它们的共有特征更容易发生变异呢？例如花朵的颜色，为什么同属内不同物种之间，花色不同时要比只有一种花色时更容易发生变异呢？特创论无法回答这些问题。但如果说物种是特征明显的变种，并且其特征已经十分稳定，这些现象就很好理解了，因为它们从一个共同的祖先分支出来以后，某些特征已经发生过变异，所以它们才会出现区别；而与那些长久未发生过变异的遗传特征相比，这些变异过的特征当然更容易发生变异了。如果某一属中有一个物种的部分器官异常发达，我们很自然地会认为这一部分器官对该物种具有重要作用，但是它也很明显地更容易发生变异。这种情况用特创论是很难解释清楚的，但是依据我的观点，这些物种从一个共同祖先分支出来后，这些器官已经发生了变异，而且可以预料的是，这种变异的过程将继续下去。但是，如果一个异常发育的器官（如蝙蝠的翅膀）是许多从属类型所共有的，应该是长期遗传的结果，那么它就不会比别的构造更容易发生变异了。在这种情况下，长期连续的自

然选择作用已经使它变得十分稳定了。

我们再来分析一下本能。虽然某些本能很神奇，可是根据自然选择学说，本能并不会比身体构造更难以解释。这样我们便能解释为什么自然是采取循序渐进的方式赋予同一纲中不同动物的许多本能的。我曾尝试用级进原理解释蜜蜂那近乎完美的建筑能力。毫无疑问，习性常常对本能的改变起着重要的作用，但并非不可或缺，就像中性昆虫所表现出来的那样，它们并没有后代来遗传其长期连续的习性。根据同属内所有物种都来源于一个共同祖先并继承了很多共同性状的观点，我们可以理解为什么边缘物种虽处于完全不同的条件下却具有几乎相同的本能，例如为什么南美洲热带和温带的鸫类与英国的那些物种一样，要在其所筑的巢里糊上一层泥土。根据本能是通过自然选择缓慢获得的观点，当我们发现某些动物的本能并不完美，且容易发生错误，甚至许多本能还会使其他动物受害时，便不会大惊小怪了。

如果物种只是特征明显而稳定的变种，我们就会发现，其杂交后代在某些性质和程度上与父母十分相似，而且和公认的变种杂交后代一样，遵循着同样复杂的法则。如果物种是独立创造的，而变种是由第二法则所产生的，上述相似性就很难解释清楚了。

如果我们承认地质记录是不完整的，那么地质记录所提供的事实就能够支持遗传变异理论。新物种缓慢地出现在连续的间隔期内，而同一时期不同类群的变化量是很不相同的。在生物演化史上，物种和整个类群的灭绝起着重要作用，新的改良类型会取代旧的生物类型，这是遵循自然选择原理的必然结果。一旦世代链条中断，单一物种或成群物种将不再重现。优势类型的逐渐散布伴随着其后代的缓慢变异，从而使得经过很长的时间后，生物类型好像很突然地在全世界范围内都发生了变化。在某种程度上，各地质层中的化石的性状介于其上下地层的化石之间，这一事实可以通过它们处于世系链的中间来解释。一切灭绝了的生物可以与现存生物一样进行分类，因为现存生物与灭绝生物来源于一个共同的祖先。由于生物的性状在漫长的演化和变异历程中会发生分异，我们便能理解为什么那些古老类型或早期祖先类型在分类谱系上常常处于现存生物类群之间的位置。总体说来，现存生物类型的组织结构要比古代类型更高级，因为在生存竞争中，新的改良类型会取代旧的、较少

改良的类型；同时，前者的器官也更为特化，可以适应不同的功能。这一事实与大量生物由于生存条件简单，因而仍保留着简单且改造较少的构造相吻合。同样的，在生物演化的过程中，某些类型为了在各个阶段更好地适应新的、退化的生活习性，从而在体质上发生了退化。最后，为什么同一大陆上的近缘类型（例如澳洲的有袋类、美洲的贫齿类等）能够长期共存，也就可以理解了，因为在同一个地区，现存生物和灭绝生物通过世系关系而紧密地联系在一起。

说到地理分布，如果我们承认在漫长的地质时期，由于气候及地理的变化及许多偶然的散布方式，生物曾经从某一个地区大规模地迁移到另一个地区，那么，我们就能根据遗传变异学说很好地理解生物在分布上的许多重要事实。为什么生物在整个地质地理、时空分布上呈现明显的平行现象呢？这是因为生物都是通过相同的世代谱系连接起来的，并且有着相同的变异方式。在同一块大陆上，在完全不同的条件下——在炎热和寒冷的环境中，在高山和低地，在沙漠与沼泽——每个大纲中的大部分生物都紧密相连。旅游者可能会觉得惊讶，但是我们很容易理解这些现象，因为这些生物是同一祖先和早期迁入者的后代。根据迁徙理论和生物变异，借助于冰期事件，我们可以很容易理解为什么在最遥远的山区和南北温带会存在少数相同的植物，而且还有许多其他相似的植物；同时也能够理解，为什么即使隔着整个热带海洋，南北温带的海洋生物有些十分相似。虽然两个地区具有适合同一物种生活的相同的自然条件，但是如果两个地区一直处于隔离状态，它们之间的生物一定存在极大的差异，因为生物与生物之间的关系是一切关系中最重要的。而且，在不同的时期，从其他地区迁入这两个地区的生物的比例是不同的。因此，这两个地区中的生物变异过程也必然是不同的。

根据这种迁徙的观点以及随之而来的生物变异，我们可以得知，为什么海岛上仅栖息着极少量的物种，而且其中的大部分还是特殊的地方性类型。我们清楚地发现，为什么那些无法跨越大洋的动物类群，例如蛙类和陆栖哺乳类，没有生活在海岛上；另一方面，为什么那些能够飞越海洋的动物，例如蝙蝠中的一些特殊类型，能够生活在远离任何陆地的海岛上。海岛上有特殊类型的蝙蝠，却没有任何陆生哺乳动物，这一事实也是特创论无法解释的。

根据遗传变异学说，如果在任何两个地区存在亲缘关系很近、有代表性的物种，就暗示着共同的祖先类型曾经居住在这两个地区。并且无论在什么地方，如果亲缘关系密切的物种栖息在两个地区，我们还会发现这两个地区所共有的物种；如果有许多亲缘关系密切的特征性物种出现在某个地方，那么属于同一类群的可疑类型和变种也会出现在那里。各个地区的生物必然与其最邻近的迁徙源区的生物有关，这是一条普遍的法则。我们可以看到，加拉帕戈斯群岛、胡安·费尔南德斯群岛以及其他美洲岛屿上的动植物均与相邻美洲大陆的动植物有着密切的联系。同样的道理，佛得角群岛及其他非洲岛屿上的生物与非洲大陆上的生物间也存在着这种联系。我们必须承认，特创论无法解释这些事实。

我们发现，所有灭绝生物和现存生物都可以按照不同的等级归入几个大纲中，并且已经灭绝的生物群的等级常常介于现存生物群之间，这是可以用自然选择及其所引起的灭绝和性状分歧学说解释的。根据相同的原理，我们也可以理解为什么同一纲中生物之间拥有复杂的亲缘关系，为什么生物在分类上的某些特征较另一些特征更为实用；为什么尽管生物的适应特征对于生物本身非常重要，但在分类学上的价值却很小。与此相反的是，虽然某些退化器官的性状对生物毫无用处，但在分类上却具有重要的价值；我们也可以理解，为什么胚胎的性状在生物分类学上最具价值。所有生物的真正亲缘关系并不在于适应的相似性，而在于遗传或世系的共同性。自然分类法是一种基于生物等级差异的谱系排列，用变种、物种、属、科等表示。我们必须依据最稳定的生物性状寻找生物的谱系线，而不用考虑其重要性。

人的手、蝙蝠的翅膀、海豚的鳍和马的蹄子都是由相同的骨骼结构组成的。长颈鹿的脖子、大象的颈都是由相同数目的脊椎组成的；许多诸如此类的事实，都可以用生物遗传变异理论来解释。蝙蝠的翅膀和腿、螃蟹的颚和脚以及花的花瓣、雄蕊和雌蕊等，虽然用途各不相同，结构却十分相似。在各个纲的早期类型中，这些器官或身体的某一构造原本是非常相似的，但是随后逐渐发生了变异。根据这一观点，上述种种相似性在某种程度上便可以解释清楚。由于在生命的早期阶段，连续变异并不总是出现，而且也不会发生遗传作用，这样我们就可以明白为什么哺乳类、鸟类、爬行类和鱼类的胚胎十分相似，但是其成体结构却

有着巨大的差异。我们也不必惊异，哺乳类和鸟类在其胚胎阶段具有鳃裂和弧状动脉（鱼类拥有发达的鳃和鳃裂，以便呼吸水中溶解的空气）。

由于生活习性和生活环境的改变，器官不使用或者自然选择作用往往会导致那些变得无用的器官逐渐萎缩，从而我们也理解了退化器官的意义。但是，不使用和自然选择只是在每个生物达到成熟期并在生存竞争必须充分发挥其作用时才能产生影响，而对幼年时期的生物器官没有太大的影响，因此，不再使用的器官在生物的生命早期不会萎缩，更不会发育不全。例如小牛，具有从早期有发达牙齿的祖先那里遗传下来的牙齿，然而这些牙齿却不能突破上颌的牙龈而长出来。我们可以理解，这种现象是出于自然选择的作用，成熟的牛的舌和颌或唇已变得颇为适合于咀嚼草料，不再需要牙齿的帮助；因此，牙齿在牛成熟前就因为不使用而萎缩了。对于小牛来说，牙齿并没有受到任何影响。根据遗传发生在对应年龄段的原则，牛的牙齿是从远古时期遗传下来的。按照特创论的观点，每个生物的各个部分都是由上帝特意创造出来的，那么那些无用的器官（如胚胎期牛的牙齿、许多甲虫类黏合翅鞘下萎缩的翅膀等）该如何解释呢？在自然界中，退化器官、胚胎构造以及同源构造等都能够显示生物变异的过程，但我们没有仔细观察，无法发现其他的奥秘。

在这里，我已经对有关事实和论据做了一番论述。我坚信，物种在悠久的演化过程中曾经发生了许多变化，主要是通过自然选择作用对无数微小连续且有益变异的积累而实现的。此外，还要借助生物体部分器官的使用和废弃这一重要手段、自然环境条件对古老生物或现存生物的适应性构造的直接影响，以及目前尚不清楚的自发性变异作用的影响。以前，我可能低估了自发变异对生物构造的影响。目前，很多人对我的结论存在误解，认为我将物种的演变完全归因于自然选择。对此，我必须声明：在本书的第一版以及随后各版中，绪论的结尾处印着如下一段话："我坚信自然选择是物种演变的最主要手段，但并非唯一手段。"可是，这句话并没有引起人们的注意。虽然误解的力量很大，但是值得庆幸的是，这种力量在科学史上绝不会延续很长时间。

我们很难想象，一种错误的学说会像自然选择学说那样，圆满地解

释上述诸多事实。然而，最近有人反对，认为这种辩论方法不可靠。但是我要说，这是判断日常事理的有效方法，也是伟大的物理学家们常常使用的方法，光的波动说就是由此而来，而地球绕其中轴旋转的观点至今尚无直接的证据。要说科学目前尚无法对生命的本质或起源的问题做出合理的解释，这也算不上有力的反驳。谁能解释地心引力的本质呢？然而，尽管莱布尼兹曾谴责牛顿，说他将玄妙的东西带入了哲学，但是现在已经没有人会反对通过地心引力得出的结论。

为什么本书所提出的观点会影响某些人的宗教感情，对此我无法解释。我们不要忘记，即使像地心引力这样人类最伟大的发现，也曾受到莱布尼兹的攻击，认为它破坏了自然信条并导致宗教信仰的破灭。如此一来，我们可以看出这种影响是十分短暂的，也就满足了。曾经有一位著名的作家和神学家在给我的信中写道："他渐渐相信上帝创造出了少数几种原始类型，这些类型又能够逐渐发展并形成其他类型，这种观点与上帝需要一种新的创造方法以弥补他的法则所引起的空白同等重要。"

有些人会有疑问，为什么几乎所有在世的博物学家和地质学家直到现在为止都不相信物种的可变性呢？人们无法断言生物在自然条件下不会发生变异；也无法证明，生物在其漫长演化过程中的变异量是十分有限的；在变种与物种之间，也不存在明确的区分标志。我们不能肯定物种的杂交必然导致不育，而变种的杂交必然是可育的；或者认为不育性是创造的标志和禀赋。如果我们把地球的历史看作是十分短暂的，就一定会认为物种是不变的产物。目前，我们对地质历史已经有了一些新的认识，在没有证据的情况下，我们不会轻易地推断如果物种发生了变异，地质记录的完整性就一定能够提供有关变异的充分证据。

很显然，人们不愿意承认一个物种能够形成具有显著特征的其他不同物种，主要原因在于尚不明白变异所经历的所有步骤之前，人们不会贸然承认这种巨变的存在。这种情形在地质学中也曾出现过。当莱伊尔最初提出陆地上岩壁的形成和大峡谷的凹陷都是由目前仍在作用着的动力所引起时，地质学家也无法相信。对于100万年这样的时间概念，人们已很难理解其中的全部含义；而对于经过无数世代所积累起来的微小变异，人们更是难以理解其真谛。

虽然我完全相信本书提出的各项观点的正确性，但是我并不想说服那些富有经验的博物学家们。他们在长期的实践中积累了大量的事实，却得出了与我完全相反的结论。在“创造计划”“设计一致”这样的幌子下，人们很容易掩饰自己的无知，有时仅仅将有关事实复述一遍，就认为自己已经给出了合理的解释。不管是谁，如果他强调不能解释的难题，而不是解释某些事实，就必然会反对我的学说。如果少数思路比较灵活的博物学家们已经开始怀疑物种不变的信条，那么本书或许会对他们有所启发。我对未来充满了信心，希望那些年轻的博物学家们能够公正地从正反两个方面看待这个学说。已经相信物种可变的人，如果能够坦诚地表述自己的信念，就是做了一件好事。因为只有这样，才能消除这一问题所遭受的质疑。

某些著名的博物学家发表了看法，认为每个属中都有许多公认的物种不是真正的物种，只有那些分别创造出来的才是。在我看来，这个结论是很奇怪的。这些博物学家承认，一直被认为是被创造出来的物种却具有真正物种所应有的外部特征，这是由变异所造成的，但是他们不愿将这一观点引申到其他类型。然而，哪些生物类型是被创造出来的，哪些生物类型是由第二性法则形成的？在有些情况下，博物学家们也无法确定，他们也承认形成物种的真正原因是变异，但在其他情况下却又否认，而且没有指出这两种情况有什么区别。总有一天，这会成为说明先入为主盲目性的例子。这些学者认为，这种奇迹般的创造作用和普通的生殖没什么区别。但是他们是否真正相信，在地球历史上，一些元素的原子曾多次被某种神秘力量控制而聚集形成活的组织呢？他们是否相信，每次假定的创造活动都能产生一个或多个个体呢？在被创造出来时，所有动植物究竟是卵子或种子还是发育良好的成体呢？哺乳动物在被创造出来时，是否带有可以从母体吸收养料的虚假印证呢？很显然，对于那些认为只有少数生物类型或者只有某种生物是被创造出来的人来说，这些问题是无法回答的。某些作者曾指出，承认有一种生物是被创造出来的，和承认成千上万种生物都是被创造出来的，这二者之间并没有什么差别；但是，由于受到莫帛邱“最少行动”哲学格言的影响，人们更愿意接受最初被创造出来的是少数物种的观点。当然，我们无法就此相信，在被创造出来时，每个大纲里的无数生物就带有从一个单一祖先遗传下来的、具欺骗性的印记。

在上述内容以及本书的其他章节里，我曾经简要地陈述过某些博物学家坚持每个物种都是分别被创造出来的观点，而这不过是记录了一些事实罢了。但正是因为这一点，我受到了莫大的责难。在本书初版时，公众的确是这样认知的。我曾经与许多博物学家探讨过进化论的问题，但是却从来没有得到认可。当时，这些博物学家中已经有一部分相信了进化论，可是他们要么保持沉默，要么含糊其辞，使人无法确认他们的观点。现在，情况完全不一样了。几乎每一个博物学家都认可进化论理论。然而，仍然有人认为物种是以一种无法解释的方式突然大量产生的新类型。许多有力的证据可以反驳这种观念。从科学的角度来看，为了未来的进一步研究，承认新生物类型是以一种无法解释的方式从旧生物类型中突然发展起来的，与承认物种是从地球上的尘土中创造出来的，并没有什么实质性进步。

或许有人会问，我究竟想把物种变异学说推广到什么地步，这个问题很难回答。因为我们所研究的生物类型差异越大，支持它们来源于共同祖先的证据就越少，说服力也越小。但是这个学说可以凭借某些颇具说服力的证据被推广得很远，例如同一纲内的生物都以亲缘关系为纽带连接在一起，都可以根据相同的法则划分为不同的等级。有时，化石可以填补现存各目之间的巨大空白。

退化器官清楚地显示，该器官在早期祖先中是高度发达的。从某种程度而言，这暗示着它们的后代发生了巨大的变异。在同一纲中，由于所有生物的胚胎早期阶段都十分相似，它们的构造都是由同一构架形成的。因此，我并不怀疑生物的遗传变异理论可以包含同一大纲中的所有成员。我认为，动物最多来源于四个或者五个原始祖先，植物也差不多是从相同数量或者更少数量的祖先繁衍而来的。

我们可以进一步类推，所有动植物都是从某一个原始类型繁衍下来的。但是这样的推测有可能将我们带入迷途。所有生物在其化学成分、细胞结构、生长规律以及对有害影响的敏感性上都有许多共同点。我们甚至可以通过一些细小的事实观察出这一点。例如同一毒素常常对各种动植物能产生相似的影响；瘿蜂所分泌的毒汁可以引发野蔷薇或橡树形成畸形的瘤。除了某些最低等级的外，所有生物的有性生殖方式在本质上是相似的；就目前所知，所有生物的胚珠是相同的，因为它们都是同

源的。如果我们只观察和研究动物界与植物界，就会发现一些低等生物的特性介于这二者之间，博物学家们常常因为这些低等生物的归属问题而争论不休。正如阿沙·格雷教授所说："许多低等藻类的孢子和其他生殖体起初是动物性的，后来却变成了植物。"根据遗传变异理论，动物和植物都是从这些低等的中间类型发展而来的。如果我们承认这个观点，也就必须承认地球上的所有生物都是从某一个原始类型繁衍而来的。但是，这个推论主要是基于类比得来的，它是否被接受无关紧要。不过，正如刘易斯的观点所主张的，在地球生命开始之初，有许多不同的生物类型同时演化形成了。毫无疑问，这也是可能的。但如果这是真的，我们可以断定只有极少数类型留下了变异后代。正如我最近指出的，每个界的成员们，例如脊椎动物、关节类动物或节肢类动物等，在胚胎同源性及退化器官的构造上都有明显的证据显示，同一界的所有成员都来源于单一祖先。

我在本书中提出的这些观点、华莱士先生的观点以及有关物种起源的观点，一旦被大家接受，就可以预见博物学将迎来一场重大的变革。分类学家们将一如既往地进行自己的工作，但却再不会被某个生物是物种还是变种的问题所困扰。仅此一点，对于分类学家们来说就是一种莫大的解脱。对于英国50多种黑草莓是否是真实物种的争论，也就可以告一段落了。分类学家们要做的，只是确定某一类型是否足够稳定（这并不是容易的事情），与其他类型是否有区别，能不能给出定义。假如这些问题都可以给出确定的答案，还需要看这些区别是否重要到足以定一个种名。这一项考虑是很重要的。因为不管两个生物类型的差别有多小，只要其间没有级进性状将其混淆，大多数博物学家就会认为这两个生物类型可以列为物种。

从此以后，我们会发现物种与特征显著的变种之间的区别在于：人们普遍承认各变种之间目前存在许多中间级进性状将其联结起来，而物种之间则曾经有过这样一种联系。由此看来，当我们考察两个类型之间目前是否存在中间级进性状时，便会仔细研究这两个类型之间存在的实际差异量。也许，目前普遍被认为是变种的类型，将来会被认为是物种。这样一来，学名和俗名就统一了。总体来说，对于物种，属是博物学们为了方便而人为组合在一起的，我们必须和博物学家的态度一样。

尽管这一前景似乎不太乐观，但是我们不会再浪费精力去寻找物种这一术语隐含的意义了。

博物学中其他知识将会引起人们更大的兴趣。博物学家们常常使用的术语，例如亲缘关系、构架的同一性、父系、形态学、适应性状及退化器官等，将不再是隐喻词，而是具有明确的含义。人们不再会认为生物是无法理解的东西。当我们认可自然界的某件东西具有悠久历史时，当我们把复杂的生物构造和生物本能看作有利于生物本身的精巧设计的综合积累（类似某种伟大的机械发明是由无数工人的劳动、经验、智慧甚至失误的综合积累）时，当我们用这种态度来研究每一个生物体时，根据我的经验，恐怕再也没有比博物学研究更有趣的事情了。

在变异的起因和规律相关性、器官使用或废弃所导致的结果以及外界条件的直接作用等方面，人们面对的是一片广阔而尚未涉足的研究领域。人工驯养生物的价值将大大提升，相比于在成千上万个已知物种中增加一个新种，人类培育出来的变种的学术价值更高一些。我们将根据谱系关系对生物进行分类，到那时，它们将能真正体现出所谓的创造性计划。一旦我们的目标确定，分类的原则将变得非常简单。我们并没有现成的族谱作为参考，必须根据长久遗传下来的各种性状去发现和追寻自然谱系中许多分支的演化关系。退化器官可以揭示早已消失的构造特征，那些畸变的物种或类群，或者被称为活化石的类型，将有助于我们重新绘制一张古代生物类型的图卷。胚胎学一般能够揭示各个大纲中原始祖先的构造，但是多少有点模糊。

当我们能够确定，同一物种内的所有个体以及同一属内亲缘关系密切的所有物种都来源于一个共同的祖先，并且是从同一个发源地迁徙而来的时；当我们能够弄清楚生物迁徙的各种不同方式，并且依赖于地质学已经揭示并将继续揭示的气候变化及地平面变化的资料时，就可以追溯地球上的生物在各地质时期迁徙的情形。现在，我们通过对比某个大陆的生物与其两侧海生生物的差异、那块大陆上各种生物的特征，并结合陆生生物的主要迁移方式，就能够大概地了解古代的地理状况。

地质学是一门高尚的学科，却由于地质记录的不完整而损失了光辉。埋藏着生物遗骸的地壳并不像一个博大精深、藏品丰富的博物馆，

而是像人们偶尔捡拾到的一些收藏品。每一个较厚的化石层沉积都需要一个非常有利的环境条件，而其上下不含化石的地层则代表着很长的时间间隔期。通过比较前后的生物类型，我们可以大概估算出这些间隔期有多长。如果两段地层中所产化石是不同的属种，那么根据生物类型的一般演替规律，我们在判定它们是否严格时必须十分谨慎。因为物种的产生与灭绝都是由缓慢进行的因素造成的，而不是什么神奇的创造作用造成的，更因为引起生物改变的最重要因素是生物与生物之间的关系，即一种生物的变异会导致其他生物的变异或灭绝，却几乎与自然条件没有多大关系。所以虽然连续沉积层中古生物的变化量不能用来测定实际经过的时间，但却可以估算相对的时间变化量。许多生物集中成一个团体时，可以长期保持不变。与此同时，其中的某些物种却迁徙到了新的地区，与那里的生物展开竞争，导致变异的发生。因此，当用生物变化量来衡量时间时，一定不要高估其作用。

展望未来，我发现了一个非常重要广阔的研究领域。心理学将在赫伯特·斯宾塞先生所奠定的，每一智力和智能都是通过级进方式获得的理论基础上，稳固地建立起来的。人类的起源和历史也将从这一理论中得到莫大的启示。

许多优秀的作者似乎都满足于物种特创说。可是在我看来，地球上古老生物和现存生物的产生与灭绝，类似于个体的出生与死亡，都是由第二性法则所决定的，这正好符合我们所知道的“造物主”给物质以印证的法则。当我们认为所有生物不是特创的，而是在寒武纪最古老地层沉积之前就已经存在的极少数生物的直系后代时，生物便显得更加珍贵了。根据过去的事实可知，没有哪个现存物种可以维持其原有特征至遥远的未来，而且只有极少数现存物种可能在遥远的未来留下后代。其原因在于，依据生物的分类方式，每个属中的大多数物种或许多属中的全部物种都完全灭绝了，没有留下任何后代。放眼未来，可以预见的是，能产生新优势物种的那些最终胜利者，应该是各个纲中最常见、分布最广泛的物种。既然所有现存生物都是极少数古老生物的直系后代，那么我们可以断定，世代演替从来没有中断过，而且也没有发生过使全球生物灭绝的灾变。由此推测，我们会有一个安全的、长久的未来。由于自然选择只对生物个体发生作用，并且有利于每一个生物的发展，那么一

切肉体及心智上的禀赋必将越来越趋于完美。

我们来看一看缤纷的河岸吧：那里草木丛生，鸟儿在树林中歌唱，昆虫在枝叶间飞舞，蠕虫在湿木中穿行，这些生物的构造是多么精巧啊！它们虽然彼此之间不大一样，却用同样复杂的方式互相依存；而且它们又都是由围绕在我们周围的法则产生的，这真的很奇妙!从广义来讲，这些法则就是——伴随着“生殖”的“生长”；隐含在生殖中的“遗传”；由于环境的直接或间接作用以及器官的使用与废弃而引发的变异；由于过度繁殖而引起生存斗争，从而导致自然选择、性状分化及较少进化类型的灭绝。这样一来，在自然界的竞争中，在饥饿与死亡中，产生了自然界最可贵、最美妙的东西——高等动物。生命及其种种力量是由“造物主”（这里指“大自然”，而非宗教上的造物主）注入少数几个或仅仅一个类型中，从最简单的无形物质中演化出的美丽又令人惊叹的生命体，而且这一演化过程还在继续进行，这才是真正伟大的思想理念!

版权信息

书名：物种起源

作者：(英) 查尔斯·达尔文著

出版社：天津科学技术出版社

出版时间：2020年7月

ISBN：978-7-5576-8260-6

版权所有·侵权必究

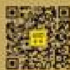
紫图书库 8025
大师经典 026

一切关于生命过去和未来的讨论，
都建立在这本书上！

- 一棵生命演化树，尽览36亿年地球生命的漫漫进化之路；
- 一本博物学日记，超多史料、全球范围实例，从观察到描述，再到总结，全面展示一个伟大理论从无到有的诞生过程；
- 一部科学侦探小说，环环相扣、步步惊心，看达尔文如何侦破“上帝造人”的谎言；
- 一卷巡礼自然的万物史诗，以科学思维的世界观看待万事万物。

人类历史上曾有两次重大科学突破，
第一次是日心说取代了地心说，
第二次是达尔文提出了进化论。





紫图图书

不懂达尔文，
你将误解世界200年间的知识更迭

自达尔文以后，世界不再是同一个样貌。

上架建议：畅销·科普
ISBN 978-7-5576-8260-6



9 787557 682606 >
定价：55.00元




Buffon

Histoire
Naturelle



用科学观点
介绍大自然的
开山之作

Naturelle

自然史

关于地球46亿年的
传世博物志

[法] 布封 / 著
高牧 / 译




一部包括地球史、人类史、动物史、鸟类史和矿物史并影响全球的经典读物

用诗意语言讲述万物起源
找回我们与自然曾共享的语言

布封被誉为“18世纪后半叶的博物学之父”，
曾被法国政府赞赏为“和大自然一样伟大的天才”

天津出版传媒集团
天津科学技术出版社

目录

前 言
动物卷
第一章 家畜禽
第一节 马和驴
第二节 牛
第三节 羊
第四节 猪
第五节 狗与猫
第六节 鸡
第二章 野兽
第一节 鹿和狍子
第二节 兔
第三节 狼和狐狸
第四节 獾、松貂、白鼬
第五节 鼠
第六节 刺猬
第七节 河狸
第八节 狮子与老虎
第九节 豺与熊
第十节 象、犀牛与骆驼
第十一节 斑马、驼鹿与驯鹿
第十二节 羚羊
第十三节 河马与貘
第十四节 羊驼与小羊驼
第十五节 树懒与猴子
第三章 飞禽
第一节 老鹰和秃鹫
第二节 鸢与鵟、伯劳、猫头鹰
第三节 鸽子、麻雀
第四节 金丝雀、莺、红喉雀
第五节 南美鹤
第六节 鹡鸰与鹪鹩

第七节 蜂鸟、翠鸟与鹦鹉
第八节 啄木鸟
第九节 鹳与鹭
第十节 鹤、野雁与野鸭
第十一节 山鹬与土秧鸡
第十二节 凤头麦鸡与鸻
第十三节 鹈鹕
第十四节 军舰鸟
第十五节 天鹅和鹅
第十六节 孔雀
第十七节 山鹑和幼鹑
第十八节 嘲鸫、夜莺和戴菊莺
第十九节 戴菊莺
第二十节 燕子和雨燕
植物卷
第一章 植物的概念与作用
第一节 植物的细胞
第二节 植物的组织和器官
第二章 光合作用和蒸腾作用
第一节 光合作用
第二节 蒸腾作用
第三章 藻类植物
第一节 蓝藻门和红藻门
第二节 甲藻门、紫菜和轮藻门
第三节 绿藻门
第四节 褐藻门
第四章 苔藓植物
第一节 苔藓植物的结构和生殖
第二节 地钱、葫芦藓和金鱼藻
第三节 真菌类植物
第五章 蕨类植物
第一节 蕨类植物的特征和结构
第二节 桫椤和铁线蕨

第三节 鳞木和鹿角蕨
第六章 裸子植物
第一节 裸子植物的形态
第二节 裸子植物的代表性植物
第七章 被子植物
第一节 根
第二节 茎
第三节 叶
第四节 花
第五节 果实
第六节 种子
矿物卷
第一章 自然元素矿物
第一节 金、银、铜、铂
第二节 砷和锑
第三节 硫、金刚石和石墨
第二章 硫化物和硫酸矿物
第一节 方铅矿和辰砂
第二节 闪锌矿、硫镉矿和辉锑矿
第三节 斑铜矿、黄铜矿和辉铜矿
第四节 黄铁矿、磁黄铁矿和白铁矿
第五节 脆银矿、深红银矿和车轮矿
第六节 黝铜矿和砷黝铜矿
第三章 卤化物
第一节 石盐、钾石盐和氯银矿
第二节 光卤石、冰晶石和萤石
第四章 氧化物和氢氧化物
第一节 尖晶石、红锌矿和赤铜矿
第二节 磁铁矿、钛铁矿和赤铁矿
第三节 红宝石和蓝宝石
第四节 水镁石、褐铁矿和水锰矿
第五章 碳酸盐、硝酸盐、硼酸盐
第一节 文石、方解石和白云石

第二节 孔雀石、蓝铜矿、钠硝石
第三节 硬硼酸钙石、钠硼解石、四水硼砂
第六章 硫酸盐、铬酸盐、钼酸盐和钨酸盐
第一节 石膏、天青石和硬石膏
第二节 重晶石、胆矾、明矾石
第三节 杂卤石和青铅矿、绒铜矿
第四节 铬铅矿和钼铅矿
第五节 黑钨矿和白钨矿
第七章 磷酸盐、砷酸盐、钒酸盐
第一节 天蓝石、蓝铁矿和独居石
第二节 绿松石、银星石和磷灰石
第三节 水砷锌矿、光线矿和钴华
第四节 砷铅矿和橄榄铜矿、臭葱石
第五节 钒钾铀矿、钒铜矿和钒铅矿
第八章 硅酸盐
第一节 橄榄石、硅镁石类和黄玉
第二节 十字石、硬绿泥石和红柱石
第三节 蓝晶石、蓝线石和蓝柱石
第四节 异极矿、符山石和绿柱石
第五节 电气石、黑柱石和斧石
第六节 锂辉石、硬玉和阳起石
第七节 针钠钙石、硅灰石和柱星叶石
第八节 白云母、锂云母和黑云母
第九节 中长石、奥长石和培斜长石
第十节 青金石、白榴石和方柱石
人类卷
第一章 人的一生
第一节 童年
第二节 成年
第三节 老年和死亡
第二章 人类本性的丧失——习俗的恶果
第一节 对男性的迫害——割礼
第二节 习俗给女性的枷锁——贞操

第三节 习俗对女性的压制
第三章 论人
第一节 人的表情
第二节 人的本性
第三节 人的双重性
第四章 人的感觉
第一节 第一个人最初的感觉
第二节 感觉的产生及传递
第三节 幸福：对长寿的体验
第四节 快乐和痛苦
第五章 论梦
第一节 梦：模糊的回忆
第二节 梦和想象
第六章 人类的社会
第一节 野蛮人和社会
第二节 社会的形成
第七章 人的优越性
第一节 人类与动物的比较
第二节 人力改造自然
自然的世代
第一章 地球及其组成
第一节 自然的分类
第二节 地球
第三节 海洋与沙漠
第二章 自然的各个世代
第一节 宇宙的发展
第二节 洪荒时代
第三节 最古老的物种
第四节 洋流和火山对地形的影响
第五节 初民生活
第六节 科学与和平
附：布封的进化观
第一节 物种退化

第二节 飞虫社会质疑

前 言

《自然史》是法国著名的博物学家和作家布封创作于18世纪的鸿篇巨作，全书包括动物、植物、矿物、人类和自然世代等几大部分，全面地论述了自然界中的事物。一经问世，立即令整个欧洲为之震动。随着各种译本的相继问世，无论科学界还是文学界，都一致给予好评。这本集科学性与文学性于一体的博物学著作，就算经过了两百多年，仍然是备受世人推崇的经典之作。

在《自然史》中，布封不仅以科学的观察为基础，用形象的语言对自然界进行了精确、详尽的描述，还提出了许多具有重要价值的创见，比如用唯物主义的观点对世界的起源进行解释，这在尚处于人们普遍以“创世纪”观念看待宇宙起源的时代，无疑有着石破天惊的效果。布封在书中对宇宙发展、地球演化进行论述时，认为地球诞生的时间远比《圣经·创世纪》中所言的早太多，而生物的形成是地球自身历史进化的产物，并随着环境的变化而变异。他同时认真研究大地、山脉、河流、海洋等，努力寻找大自然变迁留下的证据，为现代地质学的发展奠定了基础。在进化观方面，他坚持物种具有可变性这一观点，并由此提出生物转变论，以及“生物的变异会受到环境的影响”的理论，指出物种会因为环境、气候、营养等条件的影响而出现变异。布封的理论，对后来的进化论产生了重要影响，达尔文因此将他称为“是现代以科学眼光对待这个问题的第一人”。

除了高度的科学价值，布封在《自然史》中以其独特的文学创作取得了备受瞩目的文学价值。与同一时代其他博物学家在学术方面的客观冷静不同，布封借助于自己渊博的知识和细腻的文笔，在诙谐幽默的叙述中，赋予了自然万物以灵性。特别是在“动物卷”中，他以热情而浪漫的笔调将动物拟人化，不管它们有着怎样的优缺点，他都融入了博大的亲近之情。难怪会被卢梭赞誉为“有着本世纪最优美的文笔”。

以今天的科学发展来看，《自然史》在科学性上或许有些过时，但

它的文学性却值得我们始终细细品读，正如格林兄弟所说，《自然史》“是最卓越的小说之一，是最优美的诗歌之一”。布封将科学与文学巧妙融合在一起，让读者在对宇宙的广博及生命的奥秘进行探索的同时，获得了更为流畅的阅读感受。

动物卷

第一章 家畜禽

在对家畜禽进行分类时，布封根据它们与人类的关系，人工划分了等级。他用生动的语言，从生理角度细致描写家畜禽，让人对它们的特性有了更加深入的了解。比如，在对驴的描述中，布封提到：“它习惯于食用又硬又难下咽的草，哪怕这些草是马或别的动物不愿意吃的或吃剩下的；但驴对饮用水的质量很是讲究，近乎挑剔，只到自己熟悉的溪流中喝最纯净的水；驴在饮水时也很节制，绝不会把鼻子伸进水中，据说，这是它害怕见到自己耳朵的影子。”

第一节 马和驴

马

在人类所有的征服行为中，最引以为豪的就是征服了马这一彪悍又豪迈的动物。在征战中，马和人类分担着疆场的劳苦，也共享着胜利的荣光；它如同它的主人一样，有着无畏而勇猛的骑士精神，危急当前从不退却；它习惯于战场上刀剑相交所发出的铿锵声音，喜爱并追逐着这种声音，无论狩猎时，还是赛马时，抑或奔跑时，它出色的表现都能够令主人愉悦。

马的驯良让它懂得顺从人类、克制自己的动作，不会随便将自己的烈性逞于一时。它不仅服从于背上的主人的命令，仿佛还能揣测主人的意图，依据主人的表情确定自己是奔腾还是缓行，又或是停下。某些时候，它甚至是在迎合主人的意愿，用它准确而敏捷的动作来回应和执行主人的意旨。此外，在满足人们的各种期望方面，马也总是表现得恰如人愿，毫无保留地奉献自己，马不会拒绝任何命令，甚至愿意舍弃自己的生命，以求为人类提供更好的服务。由此可见，马被誉为天生就是舍己为人的动物是实至名归的。

如果具备了上述特点，那么就是被驯化的马。它们从小被人类养育，之后又经过专门的训练，供人类驱使。它们所受的教育从丧失自由开始，以接受束缚告终。由于被驯养了很长的时间，它们身上已经失去了原有的天性。马不仅在劳作时挂着鞍、披着辔，即使是休息时，人们也不会为它们解除羁绊。人类偶尔大发慈悲的时候，会任由它们自由行走于牧场，但它们身上被奴役的痕迹却永远不会消失：被衔铁勒得变形的嘴，满是疮痍和伤疤的腹侧，铁钉洞穿的马蹄。它们已经失去了自然的状态，浑身都是长期的羁绊留下的烙印。哪怕把这些羁绊一一解除，也不能让它们恢复最初的活泼和自由。那些在马的额上束一撮华丽鬓毛，将领鬃编成精致细辫，满身披上金丝锦毡，甚至戴上黄金链条的行为，并非真正在装饰马本身，只是为了满足主人的虚荣，显摆主人的阔绰，所有这些行为之于马，都和给马的蹄子钉上铁掌一样，是对马的侮辱。

但是，天性的美丽永远无可取代。自由展现自己的天性的动物才是最为美丽的。看一看那些在南美各地自在生活的野马，它们不受人类的约束和限制，在原野间腾跃奔驰；它们不需要人类的照顾，也不屑于跟人相处，它们可以自己找到适合的食物。在广袤无垠的草原上，它们奔跑、游荡，自由地采食大自然赠予的新鲜又丰盛的食物；它们没有固定的栖息住所，在苍穹之下随遇而安，呼吸着最清新的空气，这比被人类圈养在华美宫殿里的马呼吸到的空气纯净了不止百倍。所以，这些野马远比被驯养的马更强壮、矫健和敏捷，它们的身上充分体现了大自然赋予的特质——充沛的精力和高贵的精神。而那些人工驯养出的马，则只有人类赋予它们的特征——谄媚和技巧。

马的天性是狂野和豪放的，但它绝不凶残。虽然它的力量强于多数动物，却从来不会主动攻击其他动物；即使受到其他动物的攻击，它们也不会和对方正面搏击，仅仅是将之驱离，最多以马蹄踏过。它们是群居动物，却不是因为害怕被其他动物攻击而聚在一起，只是为了享受群居之乐。它们没有什么可畏惧的，也不需要组成团队来御敌，它们只是相互眷恋，不舍同伴。它们最主要的食物是草料，原野上的草木足以满足它们的食欲，完全不必为了食物与其他动物争夺；它们不是肉食动物，也就不可能为了生存资源而发起攻击。它们从不欺负弱小动物，也

不与同伴发生抢夺。而这些往往是肉食动物的劣根性。马总是能够和平相处，因为它们的欲望平凡而简单，又天生懂得节制，加之大自然为它们提供了丰富的生存资源，根本无须妒忌。马的这些优良品质，在人类饲养或放牧中得到了更多的体现。

合群和温和是马的两大天性，因此，人类需要的力量和热情只能让它们通过竞赛的方式来表现。它们会在奔跑时奋力向前，在战场上勇敢跨越，即便面对危险也会勇往直前。这些优秀、勇猛的马，奔跑得非常快，但经过人类的驯化，仍然会变得性情温和。

除了上述的优良天性，马是所有身材高大的动物中体形比例最为匀称和优美的。如果我们用马和其他动物相对比，会发现驴子太丑，狮子头大，牛的身体和腿比例失调，骆驼则完全畸形。而其他比马体形更大的动物，如大象、犀牛，它们的体形与美感毫不沾边，称之为肉团会更准确一些。兽类头颅与人类头颅主要的区别是：兽的颚骨过分前伸，这是一个代表着兽类的卑贱的标志。但是，马的颚骨虽然也很长，却不像驴那种的蠢样，又或者牛那样的呆相。马的头部比例出奇地协调，赋予了它略显高贵的精气神，这种精气神与它颈部优美的线条相得益彰。只要马抬起头，它的气质就立时显现，超越所有的四足兽。这样高贵的姿态让它们可以摒弃兽类的卑贱身份而与人类面对面。

马有着炯炯有神的目光，坦然而率真；它的耳朵大小适中，形状优美，既不似牛耳那么短，也不像驴耳那么长；它的鬃毛与头部对应，美化了颈部，让它更多了几分强劲和豪迈；马的尾巴长而下垂，完美地结束在身体的末端，与鹿和象的短尾巴以及驴、骆驼、犀牛的秃尾巴都不一样。马的尾巴由茂密的鬃毛组成，这些鬃毛似乎就是直接从马屁股上生长出来的，但它又不像狮子的尾巴那样向上翘起，而是合乎时宜地自然下垂着，还能灵活地左右摆动，驱赶会造成它困扰的蝇虫。因为马的皮肤虽然坚实，还长着厚且密的毛，但仍然很敏感，蝇虫的骚扰会使它异常苦恼。

驴

不能将驴简单地认知为秃尾巴或退化后的马，也不是杂交物种，驴

有着自己的种类，血脉纯正，与其他动物一样。虽然驴的身份远不如马那般高贵，但它拥有和马一样悠久的历史。我非常不能理解，为什么人类对驴这样温和良善、有极佳耐性、消耗不大又实用性强的动物有这么多的误解？难道消耗少、要求低的动物就天生被人类瞧不起吗？

将驴与马放在一起比较，我们会发现驴一直在遭受虐待，人们鞭打它或者任由淘气的孩童欺负它，它们没有如马那样得到人们良好教导的机会。也许有人会说，驴也会被人们豢养，但是很明显，被豢养起来的驴虽然跟马一样丧失了原有的自然天性，但却没有得到人们的细心照料。确实如此，驴没有突出的优点，它仅有的优点也在人们的残酷折磨中消失殆尽了：它是粗鲁的庄稼汉的玩具，常被肆无忌惮地嘲笑；它被迫驮运重物，还要遭受随意的棍棒击打。不得不说，我们的目光是短浅的，从来没有想过，如果世界上不存在马，那么，在牲畜中拥有最高地位的就是驴，它有着比例匀称的标准身形。只因为马的存在把第一的位子占据了，所以驴才退居第二，因为我们拿它与马比较，才产生了各种不满和批评，就这样，驴成为人们眼中无足轻重的牲畜。驴的地位在我们这样的偏见中被降低；更关键的是，驴的天性中存有的各种优点和才能被人们忽视了。事实上，驴和马相比，欠缺的就只是外形上的优势。

豪迈奔放是马的天性，而温和谦恭则是驴的天性，驴凭借着坚忍，又或者还有一些勇气，承受着人类的鞭打和惩罚；它不在乎食物的数量和品质：它习惯于食用又硬又难下咽的草，哪怕这些草是马或别的动物不愿意吃的或吃剩下的；但驴对饮用水的质量是很讲究的，近乎挑剔，只到自己熟悉的溪流中喝最纯净的水；驴在饮水时也很节制，绝不会把鼻子伸进水中，据说，这是它害怕见到自己耳朵的影子。驴在吃饱喝足之后，常常喜欢在草地上滚来滚去，但驴不会在污泥中打滚，这一点和马大不相同，它甚至因为担心四肢被弄湿，而对泥浆退避三舍，所以，驴的四肢比马的要干净很多。驴很容易被驯养，它可以帮助人们驮运重物。空闲时，驴经常躺在地上打滚，似乎在发泄主人对自己关心太少的怨气。更多的时候，它会站着观望远方。

幼年时期的驴非常欢快，体形略带轻巧和高雅，很是漂亮。只是，随着长大，驴的这些优势快速消失；这主要是因为它们受到了很多不公平对待。恶劣的生存条件，不仅使驴愈发迟钝，还变得非常固执和蠢

笨。不过，在对自己的孩子时，驴非常有爱心，老普林尼（Gaius Plinius Secundus）曾经这样说过："当它们被人们强行分开时，哪怕是穿越熊熊大火，母驴也会去找寻子女。"尽管驴常常受到人们的不公平对待，然而它们对自己主人的依恋却丝毫不减，在很远的地方它们就能闻出主人的气息。驴对居住的地方记忆很深刻，不会忘记经常走的路。在人们的认知中，这些有赖于驴良好的视力，加之敏锐的嗅觉，还有长耳朵。但驴的这些特点也让人们将其归类为羞怯的动物，据观察，耳朵比较长，听觉灵敏的动物通常都很胆小。驴驮重物时，头部是下垂的，耳朵也耷拉着；在被人们折磨时，它的表情是有些厌恶的：嘴巴噘着，完全不动弹，似乎在做无声的抗议。如果我们将躺在地上的驴的脑袋摁住，令它的一只眼睛贴着地面，再用木头或者其他东西将它的另一只眼睛遮住，它不会反抗，仍然一动不动地躺在那里。驴走路的姿势跟马差不多，只是幅度要小一些，速度更慢。和马比起来，驴的持久力会差一些，哪怕一开始它能跑上一段路，但我们要是催促它一直奔跑，它很快就会疲惫不堪。

第二节 牛

像牛和羊这样的食草动物，与人们有着很密切的关系，为人们提供了许多帮助。它们既为我们提供食物原料，又不会向我们索取过多。牛则是这些动物中最出色的，它们贡献出了取自大地的一切，即使是排泄物也能肥沃土壤。在这方面，牛比其他动物优秀太多，其他动物总是能在短短的时间内，让一片青草丰盛的土地转眼变得狼藉而荒芜。

牛还为我们提供了其他好处。如果离开了牛，人们的生活可能会出现很多问题，赖以为生的土地将成不毛之地，农田、苗圃都失去生机；如果离开了牛，农活将无法正常进行，因此，牛不仅是农民的好帮手，更是农村生活的主心骨，在农业发展中起着重要作用。牛在过往承担着为人类创造财富的重大责任；即便现在，它仍然是一些国家——特别是以农业、畜牧业为主的国家——迈向致富之路的根本。所以，牛是我们切实的财富，诸如黄金、白银这些都只是流动资产，是象征意义上的货币。与牛相比，这些象征意义上的货币，是依赖土地产品来实现其价

值，但牛的作用则是发展土地产品。

牛与马、驴、骆驼等动物相比较，驮运东西不是它擅长的，因为它的背和腰的构造不适合做这项工作。但是，牛的优势也很明显，它有较厚的颈项和宽宽的肩膀，这样的身体构造决定了它很适合牵拉类的工作。同时，牛具有庞大的体形、温和的脾气、四蹄较低、相当好的耐性，这些特性都说明它适宜耕耘。牛克服困难的耐性是其他动物不可比拟的，尽管马的力量比牛的大，但它的腿太长，这种身体构造不适宜耕耘，而且马的动作敏捷，性情却焦躁。牛做的一直是细碎的事，完成这些事不仅需要体能，更需要耐心和灵巧，但可能是这些琐事做得太多，牛逐渐失去了原有的轻快、柔和与优雅。

耕牛

一头标准的耕牛，体形既不能太肥，又不能过瘦，头要短而粗，耳朵要大；身体壮实，毛皮平滑又密实；犄角有力且有光泽；前额宽大，目光如炯；鼻子粗，鼻孔还需要张开；牙齿整齐洁白，而嘴唇则是黑色；肩膀和胸部很宽厚；颈部多肉，要有能到达膝盖部分的颈部垂皮；腰部、腹部同样要宽厚，臀部要结实；后肢粗壮有力；尾巴末端要有一小撮细毛，尾巴到达地面。另外，还要有坚韧粗糙的皮肤，发达的肌肉，较短而宽的足趾，坚定的脚步。以上就是耕牛应有的特点。

耕牛需要有灵性，才能执行人类的命令。但人们在对耕牛进行驯养时要慢慢来，不能急于求成，这样才能让它心甘情愿地为人类服务。在耕牛两岁半左右时，人们就需要开始驯养它，如果错过这个时期，想再驯养成功就会比较困难，甚至可能无法制服它。要想驯养超过这个年龄段很长时间的耕牛，就需要人们付出更多耐心，比如温和的抚摸，绝对不要妄图以武力或者暴力的方式征服它，那样只会适得其反。除了轻抚它之外，也可以把它喜欢的食物如大麦糊、磨碎的蚕豆、有盐的饲料等喂给它。与此同时，还需要把牛角捆扎起来，之后套上颈箍，可以时常让它与训练好的牛一起耕耘，它们的体格最好相差无几。在训练耕牛的集体意识时，要注意将它们小心地拴在距离草场不远的地方，然后慢慢牵着它们向草场走近，让它们彼此熟悉，习惯群居生活。训练耕牛的过程中，最好不要使用刺棒去戳它们，除非是在很难驯服的情况下。在还

没有成功训练耕牛之前，尽量不让它们做较多的耕耘工作，因为这个时候的耕牛容易疲劳。在这个阶段，还需要对它们的食量进行控制，直到训练出现了进展，才能给它们更多的食物。

水牛

性格多变、性情暴躁是水牛的特性，因此人们很难驯服它。水牛的生活习性保持着原始状态，具有很强的野蛮性。它不注重外表的清洁，可能只比猪干净一点点。水牛的野蛮性让人们很难靠近它，也就无法为它清洗，同时，因为它的粗大面孔，目光呆滞且带有敌意，所以它不讨人们喜爱。水牛的头部总是低垂着，基本没有抬起过；四肢瘦弱，尾巴短且粗，面部黝黑。

身材方面，水牛的身躯粗短，四肢细小，以及与身体不成比例的非常小的头部。它的犄角比较尖，一小撮短且卷的毛长在前额；皮又硬又厚，肉的气味难闻也不好吃；水牛的乳汁味道并不好，但产量非常高，因此成为热带地区制作奶酪的主要原料。哪怕是幼小的水牛，肉质也不好，只有舌头比较嫩。与其他部位相比，水牛皮轻盈而又结实，难以穿透，所以价值比较高。

水牛强劲有力，是耕地的一把好手。耕地时，人们会用一个套环穿过水牛的鼻子，以便控制它前进的方向。拉车时，两头水牛的力量跟四匹马的力量相等，由于水牛的脑袋和颈部下垂，使用了全部的力量，所以力量比马大出许多。

第三节 羊

绵羊

绵羊能存活到现在，并持续繁殖，得益于人类的照料和帮助。这是因为绵羊本身并不具备生存能力，特别是母绵羊，它们连基本的自我保护都难做到；公绵羊相对好一点，但也只是在自我保护能力方面略强一

些。但公绵羊只是一时之勇，连自己都无法保护，更谈不上保护同伴了。而且，较之于母绵羊，公绵羊性情更怯懦，一点微弱的声响都会吓它们一跳，因此，绵羊聚集在一起更多是为了消除心中的恐惧。除了懦弱，绵羊还很愚蠢，它们对于危险的感知能力非常迟钝，常常察觉不到危险的降临。它们总是在住处待着，不管是刮风还是下雨，都不会挪动。假如要让羊群迁徙，必须找到领头羊带路才行，羊群只会跟着领头羊行动。但领头羊跟其他羊一样，如果牧人或是牧羊犬不去驱赶，它也只会待在原地。牧羊犬的优点在驱赶羊群时十分突出，它不仅会保护绵羊的安全，还能控制它们的行走路线，绵羊在它的指挥下或分散或聚拢。

绵羊是生性朴实但是非常脆弱的动物，它们无法行走太长时间，这会让它们深感疲惫，甚至虚脱。如果赶着它们快速行走，它们会因为心跳加快而呼吸困难。另外，它们对气候很敏感，难以抵抗烈日和寒风。它们极易生病，特别是某些传染性疾病，即便是肥胖有时也能夺走它们的性命，这些都是绵羊繁殖的阻力。并且，母羊产崽时十分容易难产，所以人类的细心照顾对绵羊而言不可或缺。

山羊

和绵羊比起来，山羊的本领就强多了。而且，山羊感情丰富，不会害怕人类，甚至十分依恋人类，它们与人类和平相处，喜欢被人类抚摸。同时，山羊好动，敏捷活跃，性情活泼，人们难以将它们聚集到一起。群居生活不是山羊所好，它们习惯把住所建造在山崖上，甚至能够在悬崖峭壁上生活。身强体壮的它们非常容易饲养，几乎不会拒绝任何草料。

通常说来，动物的天性各不相同，但山羊和绵羊例外，它们的天性非常相似，身体构造也基本相同，交配、繁殖的方式也都一样，还会得相同的病，因此人们用同样的方法饲养它们。但它们之间还是存在一些差别的，尽管很细微，比如：相比之下，山羊很少患病，不怕酷热，甚至可以在烈日下休息，强光的照射不会令它们感到不适。但山羊对严寒的抵抗力很弱，这点和绵羊一样。绵羊的户外活动时间有限，但山羊却喜欢在野外撒欢，尽情展现它们的好动性格：它们或跳跃，或奔跑，有

时步行，有时静止，靠近一下又离开，跑得远远的……这些行为源自山羊内心的情感，而无法找到其他的确定性因素。山羊身体的构造和充沛的精力使得它们行动敏捷。这些特点充分展示了山羊的本性。

原山羊、岩羚羊与其他山羊

总的来说，原山羊、岩羚羊、家养山羊属于同一个物种。这个物种中，雌性之间很相似，属性也相对稳定；雄性中则形成了一些变种，彼此存在一定差异。根据这个并不违反自然规律的观点，人们可以认为原山羊是由雄性山羊演变而来，而岩羚羊则由雌性山羊演变而来。我并非是凭想象提出这个说法，这是可以通过实验证明的。自然界中，某些雌性物种可以跟其他物种的雄性交配，并繁衍后代，还能最大限度保留自己物种的特性；比如母绵羊与公山羊交配会产下小绵羊，而母山羊与公绵羊交配后，却不能产下绵羊后代。所以，我们可以得出这样的结论：母绵羊是一个独立的物种，它是公绵羊和公山羊的共同雌兽。原山羊也是相似的情况，母原山羊代表的是原始物种，属性十分稳定；公原山羊则产生了一些变化。表面上看，家养母山羊也属于这个物种，它和母原山羊和母岩羚羊相似，能与上面讲到的三种雄性进行交配，只是雄性本身产生的变化，致使它们的组合也变了，但是后代却不会出现本质上的变化。

这些关系能够体现出事物的本性。通常，为了保留物种，雌性动物做出的努力比雄性动物更多，虽然雌性和雄性在创造最初形态的动物时都尽了力，到后来却是母兽独自提供幼兽生存所需要的一切，因此母兽更多地改变或者同化了幼兽天性。如此，雄性天性中的许多特征没能得以保留。我们在对一个物种做辨别时，首先要观察雌性的特征。雄性仅仅形成生物的一半，而雌性则决定了另一半，并且提供了形态发展过程中所需的一切物质。一个漂亮母亲的孩子总是漂亮的，而一个美男子与一个丑女的孩子一般都不好看。

因此，对于同一个物种来说，有时可能会形成两个亚种，一个雄性亚种和一个雌性亚种。这两个亚种有一些相似点，但也有明显的不同之处，像是来自两个不同的物种。这就是我们无法明确区分“物种和变种”的根本原因。

第四节 猪

在所有的四足动物中，猪是进化得最不完善的，形体上的不足可能是影响它天性的主要原因。猪的所有习性都很粗野，口味也很污秽。它几乎不会分辨食物的好坏，只是本能地吞食一切出现在它面前的东西，就连自己孕育的小猪崽也不放过。这或许是由于它强大的消化系统需要源源不断的食物去满足，又或者是因为它的味觉神经迟钝，对食物没有什么要求，才会这样来势汹汹地吃东西。

猪的触觉器官也不敏感，它毛发粗糙，皮肤坚硬，更有肥厚的脂肪，不怎么在意人们的击打。有人曾经看见一只老鼠寄身在猪背上，啃食它的皮肉，但猪对此似乎完全没有感觉，从这一点可以看出，猪的触觉跟味觉一样非常迟钝。不过，猪其他的感官很敏锐。比如野猪，很远就能够望见、听见甚至感觉到猎人的存在。因此，经验丰富的猎人为了出其不意地猎到野猪，会在夜晚静静地等待，并在有风的时候马上将蹲守点换到下风口，因为风会将气味送出很远，而野猪的嗅觉十分灵敏，一丁点人类的气息都会让它转身逃走。

猎人一般都了解，三岁以下的野猪是不会分开的，它们聚集在一处，形成小队伍跟在母亲身后，直到足够强壮了才会单独行动。野猪是一种会主动聚集成群的动物，这样做是为了保护自己，在受到攻击时，它们可以依靠群体的力量抵御侵犯，相互支援。如果遇到很厉害的敌人，身强体壮的野猪会把老弱幼小的野猪护在中间，围成一圈。家猪和野猪一样，完全不需要狗的保护。但是，家猪是很难驯服的，就算是强壮又有灵活身手的成年人，也只能管理50头左右的家猪。

每到秋天，牧人会把猪放养在树林里，因为树林里丰富的果实能够为猪提供充足的食物；夏天，牧人则会把猪赶到潮湿的沼泽地里，那里有足够多的猪最爱的昆虫和植物根茎；春天，牧人都会将猪放养在荒地上，从清晨到上午10点，再从下午2点到黄昏，每天放牧两次；冬季到来，放牧次数会减少为一次，还要选择天气不错的时候，因为猪对雨雪等恶劣天气没有抵抗力。这也是为什么每每闪电打雷或是下大雨时，猪

会一边跑还一边叫的原因。不过，我们很少听见野猪的嚎叫声，母野猪的嚎叫相对多一些，公野猪只会在受重伤时发出嚎叫。受到惊吓之后，野猪会剧烈地喘息，那声音大到可以传到很远的地方。

第五节 狗与猫

家犬

我们在议论一个人时，最重视的是这个人的内在，接着再看外表；会把勇气放在第一位，其次才是力气。同样，在对动物进行讨论时，人们也会把动物的内在品质放在重要位置。内在品质，是动物区别于木偶或者植物的根本特征，也是其能够与人类相处的原因所在；同时，动物的生命之所以能够升华，就是因为它有情感，是情感使它产生了欲望，并赋予物质以意志和生气。

所以在人们的认知中，动物情感的完善程度甚至决定了它们本身的完善程度。情感越丰富，它们的能力就越强，越能肯定自己的存在，越容易与其他动物建立联系。如果这种动物具备了细腻而敏锐的情感，这种情感又能通过驯化而更加完善，那么，人类会将这类动物视为最好的帮手，让它们协助人们做一些事情，照顾、帮助甚至保护人们。更为重要的是，这类动物知道如何通过服务的勤勉和姿态的亲昵来表达自己对人的情感，因此，这类动物总是能得到人们加倍的宠爱。

狗是这类动物中的翘楚，它除了体形优美、身体强壮、性格活泼外，还拥有备受人类喜爱的卓越品质。野狗因为性情暴躁，凶猛且嗜血，常常令其他动物感到畏惧。在家犬身上，这样的天性让位给了温和的情感，它们喜欢接近人类，在主人的脚下匍匐，以依恋为乐事，以得到人类的欢心为目的，向主人贡献自己全部的勇气和精力，时时刻刻听命于主人。它们关注着主人，揣度人们的想法，能够从一个眼神明白主人的意愿。所以，尽管家犬不如人类的思想深沉，却展现了全部的情感，它甚至还比人类多出一些优点，如爱心和忠诚。家犬没有企图心，不会自私，更不会有寻仇报复的欲望，它什么都不怕，只担心自己会失

去人类的欢心；家犬很勤奋，也很柔顺；它总是忘记人类带给它的侮辱，却牢记人类的恩德。它受到虐待却不气馁，不仅逆来顺受，还尝试去忘记这些虐待；人们对它的折磨，不仅不会让它恼羞成怒，它甚至做好了迎接新的折磨的准备；它会用舌头去舔舐鞭打过它的工具，又或者会舔舔人类的手，似乎在向人类示好。这样的忍耐力与和善的性格，让人们再也狠不下心继续责打它。

另外，狗比其他动物更容易被驯服。它不仅能在短时间内被成功驯化，迅速了解人类的各种动作或者口令的含义，还能与人类表现出一样的气质：狗跟着富人，就是一副骄横的样子；跟着乡民，则是一副俗气的模样。狗在主人面前尽献殷勤，通过言谈举动、声音容貌辨别出会带来危险的人，从而阻止他们靠近。它在夜间为主人看家护院时，距离很远就能察觉到靠近的闯入者，假如这些闯入者翻越围墙，它会勇敢地扑上去与其搏斗，竭尽全力地为主人保护家宅。当闯入者败在它的爪下，它会表现出一副无比光荣、无所无畏的模样。

如果我们假设一下没有狗这种动物的世界会是什么样子，就能深切感觉到它对自然界来说有多么重要了。假如没有狗的帮助，人类难以征服其他动物，更实现不了对其他动物的奴役；即使到了现在，如果没有狗的协助，人们依旧无法发现、驱逐和消灭某些对人类有害的动物。总而言之，为了自身安全和万物之灵的地位，人类需要在动物界中不断寻找帮手，通过温和的方式与亲切的态度将具有服从意识的动物聚拢在身边，借助它们的力量对付其他动物。人类驯化狗也是为了实现这个主要目的，伴随着对狗的驯化，人类开始征服大地。

自然界中的许多动物在灵敏性、强壮凶猛等方面都强于人类，而人类驯服了狗，就等于为自己增加了新的能力，弥补了人类本身的不足之处。尽管人类为了增强和完善感官系统而制造了很多的机械器材，但从性能上来讲，它们都比不上大自然提供给我们的器材——狗。这不仅仅因为狗完善了我们的感官，还因为它为我们提供了统治其他动物的力量。相比其他动物，狗服从人类并忠心耿耿，因此人类赋予了它们永远的高贵身份——成为其他畜类的指挥者：统领牧群，让牧群听从于它，有时甚至比牧人更具权威，牧群是受它管制的群体，它领导和保护它们。它用自己辛勤的劳动保证了牧群的安全与秩序，除非在维护牧群间

的安定时，否则它从不乱施暴力。

猎犬

猎犬时刻准备投入战斗，会在听到猎人给出的枪声、号角声等信号之后抖擞精神，用跳来跳去或不停吠叫向主人表达对战斗的热情。主人的作战指示一旦下达，它们就立即潜行，迅速了解周围环境，让猎物无处藏身。通常，猎犬会通过猎物的足迹洞察猎物的去向，再向主人传递与猎物之间的距离、猎物的状况等信息。

猎物当然不会坐以待毙，它们对即将降临的危险也很敏感，会在第一时间竞相逃脱；感觉到无法脱身后，才会与猎狗斗上一斗——在逃生方法上，这些猎物往往能够使出让人们惊讶万分的本领：它们会反复行走以掩盖行走的踪迹；逃跑时不断跨越大路或者栅栏，甚至蹚过溪流，躲躲闪闪。如果猎狗穷追不舍，猎物意识到自己无法逃脱的话，就会想出更狡猾的办法：先是和年幼、没有经验的同类一起逃跑，将彼此的足迹混合在一起，之后突然离开同伴，让猎狗去追逐这些倒霉的“替死鬼”。

可惜，受过良好训练的猎狗不会被猎物这些小伎俩蒙住眼睛，它会用敏锐的嗅觉认真地搜索每一个角落，哪怕周遭乱成一团，它也能很快找到自己需要的线索。它会使出浑身解数努力追赶一开始就被它锁定的猎物，并在追上之后毫不犹豫地发起攻击，将其彻底打败，还要饮其血以解心头之恨。一只经过良好训练的猎狗能领会主人的各种意图，知道什么时候该对猎物奋力追赶，什么时候需要停下来。猎狗对食物的要求并不高，每天只需要喂食一次，它们的耳朵比较大，通常是下垂的状态。它们以灵敏的嗅觉和对主人的忠诚，成为猎人最好的帮手。

猫

猫是一种天性不忠的动物，人们之所以驯养猫，只是用以对付家庭的祸害——老鼠。猫虽然体态优美雅致（特别是在年幼时），但它们的天性虚伪而邪恶，这是人们讨厌猫的主要原因。猫的天性随着年龄的增长变本加厉，驯养只能掩盖一时，无法从根本上改变它。长大后的猫脾

性有所改变，但也更加狡猾了，学会了温顺地奉迎主人。猫喜欢强取豪夺，并将自己这样的意图隐藏在狡猾的手段中。表面看起来，猫与人类相处得其乐融融，实际上，它们对如何融入人类的生活不感兴趣。它们看向人类的眼神暧昧不明，带着怀疑或是虚伪，从不直视，喜欢兜着圈子与人接近；它们寻求人们的抚摸，并从中获得愉悦。如前所述，忠诚的动物与人类的感情非常亲密，但猫与狗截然不同，它们只是为了得到宠爱而与人类相处。也正因为这样，猫与人更能相容，而狗在人面前的表现过于真挚，因此不能完全和睦相处。

猫拥有漂亮的外表，爱干净，身手轻盈机敏，享受安逸的生活，总是在自己的住所中铺上最柔软的东西，在上面休息和嬉戏。这些习惯都是由它的天性决定的。

尽管猫栖身在屋里，与人类一起生活，我们仍然无法断言它们是人类家养的宠物，因为它们在人类世界中完全拥有自由，可以随意行走；如果它们想远离某个地方，没有任何东西能让它们多停留一刻。

猫生来怕水、畏寒，讨厌糟糕的气味；它们喜欢晒太阳，对烟囱、壁炉等温暖的地方情有独钟。它们极少深度睡眠，却总是装作一副酣睡的模样。它们常在静默中行走，步伐轻盈，悄无声息；总在远离自己住所的地方排泄，并且想方设法将之掩埋。猫喜欢整洁，因此它们皮毛干燥而有光泽，即便在夜晚也能看见；除此之外，猫的眼睛在昏暗中也会闪闪发亮。

第六节 鸡

公鸡

公鸡是一种笨拙又很普通的家禽，行走缓慢，步伐沉重，因为翅膀很短而无法飞行。它们啼声嘹亮，不分昼夜地引吭高歌，它们的叫声并没有规律，与母鸡的咯咯声截然不同。有一些母鸡发出的叫声类似公鸡，扯着嗓子叫，但并没有什么效果，因为它们叫不响，无法完全地发

出声音。为了找寻食物，公鸡搜寻地面，用爪子四处刨土，甚至会将谷粒中的小石子吞下，以促进自己的消化；它们用喙部汲水，再仰头咽下。它们的睡姿奇特，最常见的姿势是把头藏进身体一边的羽翼下，一只脚抬起。公鸡的身体和喙似乎是齐平的；脖颈向前抬起；喙下的双膜和鸡冠一样，也是红色的，这是一种特殊的物质，并不是肉状物或者膜状物。

状貌豪放、姿态高雅、目光如炬是一只强壮的公鸡应该具有的特征。如果母鸡和公鸡同属于一窝，那么它们的后代是纯种的可能性就很高；要想改变鸡的品种，就必须让不同的鸡进行杂交。有神的眼睛、殷红的鸡冠、没有疾病且匀称的身体、短短的腿和宽羽毛是挑选鸡的原则。与白母鸡相比，黑母鸡的产蛋量更高，因此深得农妇喜爱；在躲避空中猛禽的攻击方面，黑母鸡也技高一筹。

公鸡对母鸡的关心很特别，甚至会忧心于母鸡的不安。公鸡会一直照顾母鸡，时刻带领着它们，保护着它们，随时提示它们可能存在着的危险，只有看到母鸡围着自己、在自己身边吃东西，公鸡才能吃得安心而愉快。观察发现，公鸡通过变化的声音和表情，对母鸡们说不同的话，当失去母鸡时，公鸡会表现出遗憾。公鸡的嫉妒心虽然很强，又颇为多情，但却不会冷落任何一只母鸡。只有面对另一只公鸡时，它的嫉妒心才会突显，如果鸡群中出现了竞争对手，它会怒目圆瞪，鸡毛竖起，毫不犹豫地和对方展开搏斗，直至一方支撑不住，或失败的一方退出战场。众所周知，公鸡是会打鸣的，事实上，它是通过打鸣来宣布主权，以此警告那些妄图侵占它领地的外来者，并向其他公鸡宣布自己不可取代的地位。白天时，公鸡大约每隔一个小时就打鸣一次。清晨，公鸡的鸣叫声就是人们的起床号，告诉人们“天亮了，该起床了”。

母鸡

在生养后代方面，母鸡表现出了高尚的敬业精神。小鸡尚未孵化出来时，母鸡总是坚持悉心守护；等到小鸡破壳而出，它们依旧热情不减，爱心倍增。小鸡宝宝是脆弱的，需要母鸡精心的照料和保护。看着由自己赋予生命的小家伙们，母鸡的疼爱之情油然而生，不断为它们寻找食物。假如找不到充足的食物，母鸡就会将小鸡们唤回身边，保护在

自己的翅膀下，以便它们躲避危险，再用趾甲抠出地面隐匿的小虫子喂给小鸡。正因为母鸡对小鸡投入了如此多的热情，形成了特别的体质，所以我们很容易分辨出普通母鸡与带领小鸡的母鸡。带领小鸡的母鸡往往竖着羽毛，拖着翅膀，嘶哑着嗓子，叫声富于变化，母爱溢于言表。

当小鸡遇到危险，母鸡常常不顾自身的安危，拼了命也要保护小鸡。如果一只鹰突然出现在空中，一般情况下，本身弱小的母鸡会忙于逃生，但为母之后，它就变得坚强无比。它会往前直扑，不断高声嘶叫，挥动翅膀，以勇敢无畏的气势震慑入侵的猛禽。通常，猛禽不会选择与这样的母鸡搏斗，而是避开锋芒，另寻更容易对付的猎物。

母鸡在教导小鸡这件事上，也操心不少，它会一遍遍教授小鸡寻找食物的方法，以及怎么用土洗澡等生存技能。一次又一次，耐心不减。每当母鸡发现食物，就会大声地咯咯叫，把小鸡们呼唤过来。它时常半蹲着身体，方便小鸡随时躲到它的翅膀下，既能取暖又能躲避其他动物的攻击。

根据上述内容，我们可以清楚地知道，母鸡具备作为母亲应有的一切优良品质。最令人敬佩的地方在于，即使把其他家禽的蛋拿给母鸡，它也会如同照顾自己的宝宝一样，付出全部的热情。它不认为自己仅仅只是这些外来幼雏的“奶妈”，而不是它们的生身母亲。当这些“别人家的宝宝”受天性的驱使，蹦跳着冲向小河小溪中嬉戏时，母鸡会讶异、惊慌和担忧。它急于追回它们，但出于对水与生俱来的恐惧，只能在河岸边干着急，眼睁睁地看着自己孵化出来的幼雏置身于在它看来非常危险的境地中，而它却无能为力。

第二章 野兽

布封在讲述野兽时是这样论述的：我们所讨论的动物历史，一定不是某个单一动物的历史，而是全部动物所构成的历史。因此在讨论动物时，既要对它们产自何地、本能习性、繁殖期、孕期、幼崽的数量、对后代的照料、饲养的形式以及寻找食物的方式等各个方面进行研究，还要对它们在自然中的作用、能为人类提供什么样的服务等方面做出论述。这种全面性和综合性的论述观，对18世纪之后的博物学发展起到了举足轻重的作用。

第一节 鹿和狍子

鹿

鹿的视力不错，嗅觉和听觉更是非常敏锐。在丛林中驻足倾听时，鹿会抬起头，把耳朵也竖起来，这样它就能听到遥远的地方传来的声音。如果它想要走出树丛，或者走向另一个地方，它首先会仔细观察四周，接着寻找顺风的方向，判断是否存在危险。鹿天性温厚，但警惕性高，一旦听到远处有声音，就会立刻停下来，警觉地紧盯着传出声音的地方。如果与人群或者车辆相遇，只要它发现人们的身边没有武器和猎犬，就会放心地从人们身边大摇大摆地走过去。牧羊人的笛声对鹿有很强的吸引力，因此这也成为猎人捕猎它们的诱饵。

通常情况下，鹿对人没有太多畏怯，但是狗却让它发怵。鹿进食速度缓慢，吃完草后，它会找寻便于反刍的栖息地。与牛相比，鹿的反刍更困难一些，每次将胃里残留的草反刍到口中咀嚼，都需要抽动一下。之所以会这样，是因为鹿的脖颈长且弯，而牛的脖颈却短又直，所以鹿需要费更多力气才能让胃中的食物回到口中。它的这种动作类似于打嗝，在整个反刍过程中持续发生。鹿的鸣叫声会随着年龄的增长而越来

越高、越来越粗，颤抖的程度也更加明显；只有牝鹿的声音是微弱且短促的。

到了冬天，鹿只喝少量的水；春天就喝得更少了，柔嫩的草料上的露水就能满足其需求。只有在炎热的夏季，它才会去溪流、池塘、泉水边喝水。炎热的天气里，除了解渴，鹿寻找水源还为了洗澡，这能让它更凉爽一些。鹿擅长游泳，技术高超，人们曾看见它游过宽阔的大河；它在水中的耐力也很强，有人说它们可以在相距遥远的两座岛之间来回。比游泳更强的是鹿的跳跃能力，当它们被追捕时，能轻易跨越树篱或两米高的栅栏。

鹿的食物会随着季节的变化而改变，秋天，绿色灌木的花蕾、荆棘、叶子等都可以是鹿的食物；冬季，鹿会吃树皮和苔藓；初春时分，它们以葇荑花序、榛树花、芽孢等为餐；春末，田地中的麦苗是它们的美食；到了夏季，鹿的食物十分丰盛，但燕麦和鼠李是它们的最爱。

狍子

生活在高大乔木林下的鹿是丛林中最高贵的生灵；而狍子以低矮的树木为居所，所以地位低了一等。狍子力气小，个头也不大，但与鹿相比，它们更加敏捷、机灵、生气勃勃。狍子体形优美、线条圆润，颜值很高，特别是眼睛，相当漂亮，眼神中饱含热情；它的四肢有力而轻盈，无须费劲就可以高高跳跃；它的皮干净而富有光泽，它会远离泥淖，选择栖息在地势高而又干燥的地方，尽情呼吸新鲜空气。

狍子比鹿更狡猾，想要追踪它是更困难的事。但是，它有一个致命的缺点——身上散发着很重的气味，这对猎犬的刺激非常大，会令它们拼了命似的追踪。只是因为狍子动作轻盈、奔跑速度快，又擅长绕圈子，猎犬的追踪并不能为它们带来太大的威胁。狍子在躲避追踪时，并不是乱跑一气，它有自己的计谋。一旦它觉得前方的路线会有危险，会立刻杀个回马枪，来来回回绕圈子，让逃生路线上的新旧气味混合在一起，之后从这个圈子离开，找个地方隐蔽起来，一动不动，等着猎犬迷失追捕的方向。

狍子不喜群居，这一点跟鹿不一样，它们是以家庭为单位聚集在一

起，并不会成群结队，彼此不熟悉的狍子是不会相互搭理的。

第二节 兔

野兔

野兔是在夜晚觅食的动物，草、植物根部、树叶、水果、谷物等都是它们的食物，味美多汁的植物是野兔最喜欢的食物。进入冬季后，野兔会啃树皮充饥，但桤木皮和椴木皮被它们排除在外，从来不碰。如果想人工饲养野兔，需要喂它们吃莴苣或者蔬菜，但这样饲养出来的野兔，肉质不好，口感也较差。

野兔通常隔天食用一次东西，白天都在洞窟的窝中睡大觉；到了晚上，它们才会出来，觅食、散步或者交配。所以，人们只有在晚上才能看见它们活动的踪迹，或一起跳跃嬉戏，或相互追逐玩耍。野兔是本性害羞的一种动物，哪怕是最细微动作发出的声响，比如一片树叶落在地上的声音，都会令它们因惊惶而四处逃窜。交配季节来临时，雄兔总是以相互追逐的方式来表现自己的优势，而雌兔则用爪子一直骚扰雄兔，仿佛是在考验雄兔的耐心。

野兔贪睡，睡眠时间很长，睡觉时眼睛是睁着的。野兔没有眼睫毛，因此视力并不好。或许是补偿吧，它的听觉很灵敏。野兔的耳朵相比它的身体而言特别大，它能灵动轻巧地晃动这两只长长的耳朵，这也是它奔跑时的方向盘，用来控制方向。野兔的奔跑速度非常快，能很轻易地跑过其他动物，因为它们的前腿比后腿短很多，上坡比下坡更有优势，所以当它们遭遇追赶时，总是习惯往高处逃生。与其说野兔是在奔跑，不如说是在轻快地跳跃。它们的脚底板覆盖着绒毛，行走时静悄悄的，不会发出声响。野兔或许是唯一一种口腔内长毛的动物。

对于余暇甚多的乡民而言，猎捕野兔不仅是他们日常的娱乐方式，更是他们谋生的手段。猎捕野兔不需要准备工具，也不用花费什么，这是一件任何人都可以做的事情。人们只需要在清晨或者傍晚等待野兔归

来或者外出就好；或者在白天寻找野兔的栖息地。晴朗的天气，日照充足，由于野兔总是长时间地奔跑，因此返回窝中休息时，它们身上散发出的热气会形成水汽，从而让它们很远就暴露在经验丰富的猎人眼中。根据这个特征，他们很容易就能在洞窟中把野兔堵个正着。通常情况下，野兔不会害怕人类的靠近，特别是人们装作对它视若无睹，或者迂回着靠近而非径直走向它时。但是，和鹿一样，野兔对狗很是畏惧，一旦听到狗的声音或者感觉狗会袭击自己时，它会转身就逃，尽管它的奔跑速度比狗快很多，但它的奔跑途径不是直线，而是在同一个地方转来转去，因此狗想追上它是轻而易举的事。

野兔喜欢选择干燥的地方作为其居所。夏季，它们待在田野中的时间很长；秋季，在葡萄园中经常能看到它们的身影；冬季就待在小树林或是矮树丛中。无论何时，猎人都可以不用猎枪，仅仅借助猎犬就抓捕到它。野兔时常受到老鹰、猫头鹰、狐狸、狼等动物的攻击或者捕捉，它们的敌人很多，一旦被锁定就很难有逃生机会，只有少数的野兔能侥幸活下来，享受大自然的赐予。

穴兔

尽管外表和结构上，野兔和穴兔非常相似，但它们之间的区别很显著，不能混为一谈。在繁殖能力上，穴兔远远超过野兔，尤其在环境适宜的地区，它们的繁殖数目惊人，这个地区的植被因此被极速消耗，无论是青草、植物根茎，还是种子、果实和蔬菜统统被它们吃光，连小树也难逃厄运。好在大自然中还有白鼬和狗，因为它们的存在，穴兔居住地区的居民才能够维持正常的生活。与野兔相比，穴兔生育的频率和数量都要更快、更多，同时，它们有更多的方法躲避天敌的追捕，比如，它们能够从猎人的眼皮下轻松溜走；往地下打洞，白天待在洞里，躲避狼、狐狸、猛禽的袭击。它们会在洞穴中安心哺育幼崽，直到幼崽两个月大的时候，母兔才会带着幼兔走出洞穴。这时的幼兔已经具备了基本的生存能力，可以应付各种情况了。野兔的情况与此相反，幼小的野兔是最容易受到伤害的，野兔的伤亡大量发生在它们幼年时期。

仅凭这一点，就能看出穴兔的生存能力比野兔更强。虽然它们的外表相似，性情也一样胆怯，把洞穴挖在隐蔽的地方，但野兔仅是在地面

上打洞安巢，很容易就被找到；而穴兔钻入地下，有了更能安身立命之所在。

第三节 狼和狐狸

狼

狼是肉食动物中，胃口最大的动物之一。大自然赋予了它很多本领，以满足它这种嗜好：狡诈的性情，敏捷的动作，强壮的身体……总之，它具备一切有利于发现、攻击、撕咬、吞食猎物的手段。尽管这样，狼还是常常饿死，因为人类已经向狼宣战，甚而用悬赏的方式捕杀它们。在人类的紧逼下，狼不得不逃窜到树林中，哪里可供狼食用的动物本就不多，偶有几只也是那种跑得飞快的，能迅速躲过狼的追捕。狼只能寄望于侥幸或是报以耐心，长时间埋伏在动物出没的地方，才有可能果腹，但这种概率显然很低，等待也就常常落空。

狼的天性是粗鲁而愚钝的，但也会在需要时变得异常机智和勇敢。被饥饿折磨时，狼会不顾危险地攻击受人类庇护的牲畜，特别是那些它不用费太大力气就能拖走的羊羔、小狗、小马等小牲畜。一旦行动成功，它就会如法炮制，直到被人类打伤或被牧犬赶跑。白天，狼会躲在洞穴中，晚上才到外面活动，因此只有晚上才能看见四处游走的狼；狼也只有在晚上才会到人居住的村子周围游逛，掠夺被遗弃的家畜或家禽；有时，它甚至会突袭羊圈，疯狂地刨挖门下的土，进去大开杀戒，然后挑选并带走猎物。如果行动失败，它会返回树林深处，寻找捕杀其他动物的机会。狼在树林中捕杀猎物时，会选择团队作战。如果饿到无法忍受，它会孤注一掷地把攻击目标设定为人类，袭击妇女和小孩，甚至是扑向成年男子，这种极端行为会让它疯狂，其结果就是走向灭亡。

狼的外表与结构乍看起来和狗非常相似，仿佛是一个模子里刻出来的。但是，它们表现出来的品性却截然相反。狼的天性和狗区别很大，不仅不相容，甚至站在完全的对立面上；从本能上来说，它们彼此相互仇视。小狗第一次碰到狼时，会浑身战栗，因为狼的气味而惊骇无比，

立刻回到主人的身边，以求得到主人的庇护；看家狗最清楚狼的本领，它见到狼就会竖立毛发，愤怒龇牙，竭尽全力地赶开这个敌人。如果狼和狗碰到一起，要么相互避开，要么就是彼此厮杀，场面之激烈，不拼个你死我活不会停下。如果狼更加强大，狗会被它撕碎，然后吞进肚子；如果是狗取得了胜利，则会显现它宽容的一面，将受重伤的狼留给乌鸦或者其他狼。狼是一种会吞噬同类的动物，其他的狼受血腥味的吸引，会沿着血迹追踪过来并群起而攻之，最后吃掉它。

就算是野狗，天性也不太凶残，易于驯养，并且忠于主人。但狼不是这样，即使人类可以驯养抓到的狼崽，但也不能改变它残暴的天性，它不会依恋主人，只要有机会，它就会重返野蛮的状态。而狗就算再粗野，也能与其他动物和平相处，它们似乎天生就是其他动物的“陪伴者”。看守羊群是狗最擅长的事情，还能起到指挥的作用，这仅仅出于狗的本能，而不完全是人类训练的结果。与此相反，狼对群居生活充满仇视，更不要说聚集在一起生活，同类之间也不会相互为伴。如果我们看见许多狼聚在一起，那一定不是什么亲密的聚会，而是战争的开始，它们会发出恐怖的嗥叫，以团队的形式去攻击如鹿、牛等体形较大的动物，又或者是攻击阻碍它们的牧羊犬。一旦结束攻击行动，它们立即会四散，重新回到独自生活的状态。

狼具有强悍的力量，尤其体现在前半身的脖颈、颚部，肌肉发达。狼叼着一只绵羊也能疾速奔跑，远超牧人的速度，只有牧犬才能追上它，并逼迫它放弃猎物。狼在撕咬猎物时非常残忍，越是不反抗的猎物，狼撕咬得越厉害，反而是奋起反击的猎物会让它畏惧，从而不用那么大的劲。通常情况下，狼是怕死的，若非必要，它绝不以命相搏。如果人们用枪打断它的一条腿，它会大声嗥叫，但在人们挥舞棍棒要取它性命时，它却不会像狗那样哀鸣。跟狗比起来，狼更加残忍且强壮，但它没有狗的敏捷。狼精力旺盛，可能是所有动物中最精神的，常常四处游荡，不知疲倦。狗温和而勇敢，狼残暴却怯懦，如果落入猎人的陷阱，它会惊慌无措，失去还击能力，只能任人宰割。猎人捕到狼之后，会把项圈戴在它的脖颈上并套上锁链，拉着它四处示众。狼在这种时候一点脾气都没有，也不会流露出愤怒，就连不满的情绪都不敢表现出来。

狼的感官灵敏，视力、听力以及嗅觉都很敏锐，它能够闻到远处看不见的东西的气味，特别是血腥味，最能刺激它的感官。狼能够沿着从很远的地方传来的动物气息一路追踪，持续很长时间。从树林离开之后，狼会先确定方向，再停在树林周围嗅一嗅，空气中若有动物气息或尸体味道传来，很快就会被它闻到。狼喜欢吃新鲜的肉，不怎么吃腐肉，不过在饥饿难耐时，即便是垃圾桶中的臭肉它也来者不拒。也有研究表明，狼对人肉有极大的兴趣——假如它能轻易打败人类的话，或许人肉会是它最主要的食物。有人曾见过狼群尾随军队来到战场，战争中死去的人常被草草掩埋，狼会从泥土中把这些尸体挖出来，狼吞虎咽，吃再多也填不满它贪婪的胃。这种吃习惯了人肉的狼，就会时常攻击妇女和儿童，人们将它们称为“狼妖”，一定要多多提防。

狼对于人类来说，除了皮毛还有些用处之外，其他一无是处。它的皮毛虽然有点粗糙，但保暖性还不错，且很耐用，可以制成裘衣；狼肉的肉质很差，被其他动物嫌弃，只有狼自己才会消化同类的肉，因为要填饱肚子，狼几乎什么东西都能吞下去，腐肉、骨头、兽毛，就连粘着石灰的半成品硝皮都吃，这不仅让它们呼出恶臭的口气，还使得它们常常呕吐，所以它们倒空肚子的时候比填满肚子的时间还多。总之，狼的一切，外貌、叫声、气味、天性等都让人生厌，生而有害，死而无益。

狐狸

人们提到狐狸，就会想到诡计多端、奸诈狡猾之类的词，这不是没有道理的；狼用蛮力完成的事情，狐狸通常都会借助于诡计，多数时候都能得逞。狐狸从来不会与牧人或者猎犬正面交锋，也不会主动去攻击牲畜，更不会拖走动物的尸体，因此狐狸活得更加安全。正如我们上面提到的，狐狸喜欢动脑筋，它会投机取巧，而非盲目行动，这是它们最大的优势。狡猾慎重、小心翼翼是狐狸的天性，它们耐性极好，行为多变，懂得在恰当的时机使用合适的手段。它时刻保持警惕，懂得如何保护自己，和狼一样拥有长途奔跑的能力，甚至比狼还要轻盈灵活。但它对自己的奔跑速度并不太自信，为了确保安全，它会为自己构筑非常隐蔽的巢穴，以便在遇到危急的情况时有个藏身之处，同时它会在那里居住并养育后代，因此，狐狸属于定居型动物，而不是流浪型动物。

狐狸非常注重自己的住所，还会考虑住所的舒适度，这一点像极了人类。狐狸会在构筑住所时选择最好的地势，巢穴的入口也是有讲究的，这表示狐狸具有高级智慧生物的特点。狐狸的聪明还表现在它擅于把外部条件转化成对自己有利的条件，比如它会选择在与村庄距离比较近的森林边缘居住，在这里很容易就能听见家禽的声音、闻到猎物的气味。它对时机的把握令人称奇，常常不露声色和形迹地行动，很少失手。

倘若能够越过栅栏或者从栅栏下面钻过去，狐狸就会利用这个时机将家禽棚摧毁，杀死家禽，再带着其中之一迅速撤离，把战利品藏在苔藓或者洞穴里；一段时间之后，再返回去带走另一个猎物，但不会藏在同一个地方；往返数次，带走第三个、第四个猎物……直到天亮或者宅院中的动静提示它危险可能来临，它才会停止行动。在野外树丛中，它也会用类似的伎俩。猎人会在树枝间布满黏鸟胶，或者在树丛中设下圈套，而狐狸会抢在猎人之前多次巡视这些陷阱，提前将在圈套中挣扎的鸟雀带走。狐狸放战利品的地方每次都不一样，苔藓或者刺柏的下面是它经常选择的藏匿地，一般会放上两三天，需要食用的时候才去拖出来。幼小的野兔有时也会成为狐狸的猎物，狐狸会跑到野兔的洞窟中围堵它们，甚至会到饲养兔子的禁猎区偷袭小兔子。狐狸也喜欢伏击山鹑或者鹌鹑的巢穴，将正在孵蛋的母山鹑或者母鹌鹑掠为口中美食。狼祸害的往往是动物中的“平民”，而狐狸总是危害动物中的“贵族”。

狐狸贪吃，胃口跟一般的食肉动物一样大，对蛋、奶及奶制品、水果等食物来者不拒，最喜欢的水果是葡萄。当它捉不到野兔、山鹑时，会把目光投向老鼠、田鼠、蛇、蜥蜴、蟾蜍等一类小动物，间接地给人类带来一些益处。狐狸对蜂蜜情有独钟，所以常常袭击野蜂、虎头蜂、大胡蜂。尽管野蜂会以刺来抵抗和驱逐狐狸，狐狸被蜇时也会后退，但它并非退开，而是在地上打滚，将野蜂压死。这种方法对付野蜂很有效，野蜂无奈之下只能放弃蜂窝逃走，其中的蜂蜜和蜂蜡就变成了狐狸的盘中餐。狐狸捕食刺猬时，会用爪子不停地推刺猬，迫使刺猬翻过身来，仰面躺着。除此之外，鱼、虾等水产品也在狐狸的食谱上。

狐狸的感官和狼一样敏锐，甚至超过狼，它的发音器官更加灵活和完善。狼只有单一的嗥叫声，而狐狸能够发出多种音调，除了嗥叫、尖

叫，有时甚至会发出类似于孔雀叫声的哀鸣声。狐狸会在不同的情况下发出不同的声音：追捕猎物的声音，表现欲望的声音，幽怨的声音，以及痛苦的哀鸣。狐狸通常只在受到枪伤或者腿断掉时才会发出哀鸣声，轻伤时，它是不会喊叫的。和狼一样，狐狸在遭受棍棒的责打时，哪怕是被打死也不吱声，但会勇敢自卫。人被狐狸咬中是非常危险的事，除非借助铁器或者棍子，否则狐狸不会松口。狐狸的尖声急叫与狗的吠声相似，由一组相近且急促的声音组成。冬天，特别是下雪或者冰封山林时，狐狸会不断发出叫声；但在夏天，狐狸会保持沉默。

狐狸往往睡得很沉，人们很容易靠近它而不把它惊醒。它睡觉时把身体蜷缩成一团，只有休息时才会将后腿伸开，直挺挺地趴在地上。这也是它窥视鸟雀时常用的姿势，鸟雀对狐狸又厌又惧，只要看见它就会发出警告的鸣叫声，以提醒同类。特别是乌鸦，它们常常会跟踪狐狸，时刻低声传递警报，有时能跟踪几百米远。

第四节 獾、松貂、白鼬

獾

獾是一种生性懒惰又多疑的独居动物，它们藏身于一切偏僻的地方，在阴暗的树丛中建造地下洞穴。它们生命中的大部分时间都在黑暗的洞穴中度过，只有在寻找食物时才会出来。因此在人类看来，它们是在逃避群居生活，甚至是躲避阳光。

獾身子长、四肢短，前肢的趾甲非常长，而且坚固结实，这利于它们刨土以建造洞穴，獾会把刨出来的土壤推到身后。

獾的洞穴建造得迂回曲折，挖掘的路线也拐弯抹角，可以推进到很远的地方。狐狸没有獾这种建造洞穴的本领，经常会想方设法地将獾的洞穴占为己有：吓唬它们，在它们的洞穴口守候，甚至将粪便扔进洞穴中，等等，迫使獾离开家后，狐狸就会占领这个洞穴，将之加宽，清理干净，变成自己的住所。被迫放弃家园的獾不会走远，会在一定距离之

外重新建造一个洞穴。獾是昼伏夜出的动物，而且不会离开洞穴太远，只在附近寻找食物，一旦感觉到有危险，就会立刻返回洞穴。这是它自我保护的唯一方法，因为它的腿实在太短了，跑得比较慢，通常难以躲避敌人的追捕。如果狗在獾的洞穴外遇见了獾，没有人类的帮助，狗很难制服獾，獾的皮毛很厚，腿、鄂、牙齿、爪子十分坚硬，当狗把它扑倒在地时，它会全力反击，使狗受到严重的伤害。此外，獾生命力顽强，能拼死抵抗很长时间，直到生命的最后一刻。

松貂

松貂栖息在多草木地区，常常把洞穴建造在树洞或是灌木林中。它们不会藏在岩壁中，只在树林间穿行，在大树顶端攀缘。它们以猎捕鸟雀为生，四处搜寻鸟巢是它们最重要的工作；它们吃掉鸟巢中的蛋，导致大量鸟雀死亡。松鼠、田鼠、山鼠等小动物也是它们的猎物，而且松貂非常喜欢食用蜂蜜。我们很难在旷野、乡村、田园中见到松貂的身影，它们也不会靠近人类居住的地方。松貂与榉貂被追捕时的表现有很大区别：榉貂如果意识到有狗在追踪自己，会立即想办法摆脱狗的追踪，躲到洞穴里；但松貂不一样，它会在狗追踪自己很长时间后才爬到树上，在枝头上看着狗从下面经过。冬季，松貂因为跳跃着前行，会在雪地上同时形成两个脚印，像是大兽留下的脚印。

松貂的身体较之石貂要肥大些，但它头短，后肢长，奔跑起来比较容易。它们喉部的区别也很明显，石貂是黄色的，而松貂则是白色的。与石貂相比，松貂的皮毛更细、更密，而且很少脱落。松貂虽然不会像石貂那样特意为小貂准备床铺，但小松貂的住所却更加舒适。众所周知，松鼠在树顶上筑巢的技术十分高超，正是因为这样，松貂会在生产之前将松鼠赶离其巢穴，然后将原有巢穴口拓宽，为小貂的出生做准备。松貂有时也会将鸮的旧巢占为己有，或者霸占一个树干，将树干上的其他鸟强行撵走。春天是松貂的产崽期，一胎通常有两到三只小貂。刚出生的小貂还没睁开眼睛时，母松貂会给它们喂食小鸟或者鸟卵，等到小貂长大，才带着它们去外面捕食。

白鼬

白鼬通常是在靠近村舍的针叶林或混交林中栖息，不过草原、草甸及河湖岸边的灌木丛等地方也有它们的踪迹。白鼬与一般的鼬相比，身体更为狭长，四肢短小，冬季时，四足会被厚实的长毛覆盖。白鼬的毛色会随季节变化而变化。夏天时，它的背部毛色是灰棕色，腹部为白色，足背为灰白色。到了冬天，全身毛色都变为雪白，只在尾端留下一点黑色。白鼬是食肉动物，鸟类和小型的哺乳动物是它捕食的对象。

如果白鼬能进到鸡舍中，它攻击的目标通常不会是大公鸡或者老母鸡，而是小母鸡或小雏鸡，它会一口咬住它们的头部，将之置于死地，然后一只只地从鸡舍拖走。白鼬吃鸡蛋很有一套，它会将蛋壳打破，吸食里面的东西，以人们能想象的贪婪姿态吸食鸡蛋。白鼬会在粮仓中待上一整个冬季，即使春天来了也待在里面，它们会将小白鼬产在粮仓中，或者草堆、麦秆中。待产的白鼬会向老鼠宣战，一般情况下老鼠逃脱不了它的追捕，因为白鼬头尖，能不费力气地钻入老鼠洞，从这一点来看，它消灭老鼠的能力比猫要强。白鼬还能钻到鸽子窝里逮鸽子。夏季来临，白鼬会离开房屋，到地势低洼的地方或是水车周围、沿河地带，利用小树林藏身，寻找捕捉鸟雀的机会。白鼬在春天生产，一胎能有四五只幼崽，偶尔两三只。白鼬常常将幼崽产在柳树洞中，用干草、麦秆、树叶等东西为幼崽铺床，与黄鼬、松貂、榉貂一样。小白鼬刚刚出生时双眼也没有睁开，但小白鼬的生长速度惊人，很快就能在母亲的带领下外出觅食。它们奔走在草原上，吞食鹌鹑和鹌鹑蛋；它们也会向游蛇、鼹鼠、田鼠等动物发动袭击。它们的步伐很不协调，多以小步跳跃的姿势前行；但上树时优势尽显，能一跳好几米，这在捕食鸟雀时简直方便极了。

第五节 鼠

松鼠

松鼠是一种半野生的美丽的小动物，友善温顺中又带一点野性。它不是肉食动物，基本不会危害到人类，因此备受人类的喜爱和保护。虽然松鼠偶尔会捕捉鸟雀，但它们主要以水果、榛子、榉果、橡栗为食。

松鼠洁净、灵敏、活泼，有着亮闪闪的双眼；它面目清秀，动作敏捷、四肢有力；蓬松的大尾巴举过头顶，更加烘托和装点了它的优雅。

松鼠不太符合大多数四足动物的特征，它多是直立而坐，以前爪为手把食物送到口中。它不是在地底生活，而是生活于地面之上；它的身姿像鸟雀一样轻盈，可以栖息在树梢上，跳跃在丛林间，也可以把巢筑在树枝上，采集果实，吸吮露水，只有在狂风摇动树木时，才会下到地面。松鼠不会靠近人类居住的地方，甚至在空旷的平原或者开阔的田野中，我们也见不到它们的身影。它们更喜欢待在高高的树林或是葱葱郁郁的乔木林中，而不会栖身于低矮树丛中。与地面相比，松鼠更怕的是水，当它必须涉水时，会把树皮当作船，尾巴当作桨。松鼠的警惕性非常高，不像睡鼠那样需要冬眠，只要有人触碰它栖息的树木，它就会立即逃离自己的巢穴，跳到另外的树上，或者躲到其他树枝后面。松鼠会在夏季囤积榛子，储藏在老树的枝干缝隙中，当作过冬的食物。下雪的冬季，它们会用爪子将雪刨开，在雪下寻找食物。松鼠嗓门大，叫声尖锐，比石貂还有穿透力，一旦被激怒，就会发出低沉的吼声。

夏天的傍晚，我们能够听到树林中相互追逐的松鼠的欢叫声，也许是它们对强烈的日照有所畏惧，所以白天都躲在巢穴中，到了晚上才出来觅食、嬉戏。松鼠常常将巢穴搭建在树杈上，干干净净又舒适温暖，避雨功能也很好。它们搭建巢穴时，会先将一些小树枝运来，然后用苔藓编扎在一起，再用后肢挤压结实，令其宽敞、牢固，以便在里面自在生活，同时保证自己宝宝的安全。松鼠巢穴的出口通常面向高处，大小合适，刚好能容纳一只松鼠进出；出口上方会有一个用来遮蔽巢穴的圆锥形盖子，下雨天时雨水会顺着盖子流下去，保持洞穴内部不会受雨水侵犯。寒冬过后，松鼠开始换毛，新毛会比原有的毛色深很多，松鼠会用前爪和牙齿整理自己的毛发，使之整洁而光滑，所以它们身上几乎没有异味。

老鼠

老鼠之所以惹人讨厌，是因为它常常给人们带来许多麻烦。老鼠喜欢藏身于人们堆放谷物或水果的粮仓中，还会在房间里四处乱窜。老鼠是肉食动物，更确切地说，它是杂食动物，对咬不动的东西有特别的爱

好，喜欢啃食羊毛、布料、家具等物品，还能凿穿木头，在墙上打洞，躲在厚木板的夹层或者房梁、壁板的缝隙中。老鼠外出觅食时，总是把所有能拖动的东西全部运回洞里，时常会将栖身的缝隙也当作储藏室，特别是在产下幼崽后。老鼠的繁殖力强大，一年中产崽数次，多数都是在夏季，一胎有五到六只。冬季，老鼠会朝温暖的地方靠拢，比如壁炉旁边、干草中或是麦秸堆里。虽然猫、鼠药、捕鼠器等的存在对它产生了威胁，但它惊人的繁殖速度，仍然给人们带来了很大的损失。特别是农村的老房子，人们习惯将谷物存放在顶层的仓库中，这个地方距离干草堆和粮仓都比较近，因此成为老鼠最好的藏身处和繁殖地。老鼠的数量之巨，如果不是它们会因为内部矛盾而相互残杀，就会逐步扩展领地，迫使人们搬迁粮仓。不过，有人曾观察到，受到饥饿威胁的老鼠会自相残杀，并吞噬同类。因此，当老鼠泛滥而粮食不足时，老鼠中的强者便会将弱者视为目标，咬开弱者的头颅，吸食其脑浆，再吃掉残余的部分；这样弱肉强食的战争会持续一段时间，直到大部分的老鼠死亡为止。正因如此，人们会觉得老鼠骚扰人们一段时间后好像就突然消失了，这种“消失”有时会持续很久。这种情形也发生在田鼠身上，只要食物缺失，它们就会同类相残，数量也因此锐减……

老鼠产下幼崽后，会为它们准备食物和床铺。母鼠会时刻不离地守在幼鼠身边，直到它们长大到能够离开洞穴。为了保护幼鼠，母鼠甚至会不顾危险与猫周旋和搏斗。一只成年老鼠要比一只幼猫更厉害，虽然它们的力气差不多大，但老鼠牙齿尖锐，咬合力更强，猫实际上是咬不过它的，只能凭借爪子搏斗。猫对付老鼠，依靠的更多的是实战经验而非单纯的体力。老鼠的天敌中，对其更有威慑力的是白鼬。虽然白鼬的体形比较小，但它能够钻入老鼠的洞穴。有时，老鼠与白鼬间的搏斗会持续很长时间，因为它们的力量相仿。它们拥有不同的武器：老鼠需要反复攻击才能对白鼬造成伤害，而且可以利用的仅仅是不够锐利的门牙。老鼠的门牙位于鄂的末端，并不能使出很大的力气，但白鼬是用整个鄂部去咬，能够一口就咬死不放，它会吃掉对手被咬破后流出来的血，所以能够很容易将老鼠打败，并杀死它们。

小家鼠

与黄胸鼠相比，小家鼠的体形要小很多，它们的数量也更多，分布范围广泛，因此更常见；小家鼠的本能、天性、脾气都和黄胸鼠很类似。唯一不同的是：小家鼠更加弱小和胆怯；小家鼠不会远离自己的洞穴，一点细微的响动都会吓得它逃回洞穴，它们生性胆怯、温和柔顺，不会给人们带来太大的损失，还能够在一定程度上被驯化，但它不会对人类存有依恋。小家鼠的弱小使它拥有很多天敌，如猫头鹰、猫、榉貂、白鼬、夜间活动的鸟，甚至是鼠；人们设下各种诱饵也会让它丢掉性命，死亡率相当高；小家鼠能存活下来，很大程度上得益于它们强大的繁殖能力。小家鼠若想从天敌手中逃脱或者躲避天敌的追捕，只能依靠自己灵活的反应。

我曾经看见过一只在捕鼠器中产下幼崽的小家鼠，几乎全年都是它们的繁殖期，一胎产下五六只幼崽，小家鼠幼崽的生存能力很强，出生十几天之后就能到外面谋生。亚里士多德曾说，在储藏粮食的瓮中放入一只怀孕的家鼠，里面很快就会有一百多只互为兄弟姐妹，而且全部来自同一个母亲的小家鼠。小家鼠的繁殖能力之强由此可见一斑！

小家鼠的外貌还算看得过去，它们神情活跃，带有几分机灵，人们之所以对它不感兴趣，是因为它们常带给人类烦恼。一般来说，小家鼠的腹部毛发泛白，有些小家鼠全身都是白色的，也有褐色和黑色的，深浅不一。小家鼠分布在欧洲、亚洲和非洲等地区。据说美洲一开始并没有小家鼠，是因为欧洲人的迁徙，才带来了小家鼠。这个说法有一定的道理，因为小家鼠喜食人们制作的面包、奶酪、肥肉、植物油、黄油等食物，所以会追随着人们，生活在人们居住的地方。

鼹鼠

鼹鼠看上去好像是“瞎子”，但事实并非如此。人们会这样以为，是因为鼹鼠的眼睛细小而隐蔽，严重影响了它的视力。“造物主关上一道门的同时，一定会再打开一扇窗”这句话也适合鼹鼠，它没有正常的视觉，却有着异常灵敏的听觉。鼹鼠与其他动物最大的区别在于它由五趾组成的足，与人类的手掌像极了。鼹鼠体形丰腴，皮毛丰厚，力气不小；它们性情温和安静，偶有几分孤傲，还有一项很强的本领——能在短时间内挖掘好一个隐秘的蔽身之所，并且具有很好的延展性，让鼹鼠无须外

出，就能够找到维持生命的食物。以上，就是鼹鼠的天性、习性与本能。

鼹鼠会将自己洞穴的入口封上，几乎从不离开，除非碰上雨水过多的夏季，它的洞被淹没了，或者园丁破坏了它洞穴上方的盖子。鼹鼠称得上动物界中杰出的建筑师，它能在草地上轻易筑起圆形的穹顶，或是在花园中开辟出长长的通道。不过，鼹鼠对土地的要求较高，既不能是烂泥，也不能是坚硬的、有许多小石头的泥土，它精心挑选柔软的土地，不仅要有充足的水分，还要包含可以食用的植物根部，如果有丰富昆虫和蠕虫那就更理想了，这是它们的主要食物。

鼹鼠几乎从不离开自己的住所，因此很少树敌，即便遭遇敌人的袭击，也能轻易逃脱。对它们而言，泛滥的河流就是最大的灾难。人们曾经在洪水中见到大量涉水逃生的鼹鼠，它们拼命爬到更高的地方，但大部分的鼹鼠会失去生命，洞穴中的鼹鼠幼崽也难逃一死。而从另一个角度看，如果没有洪水的抑制，鼹鼠的超强繁殖力将会给人们造成严重灾害。

第六节 刺猬

古希腊有句谚语，说“狐狸知道许多，但刺猬专精一项”，这句话非常准确地表明了刺猬的特性，虽然它没有狐狸的机智和狡猾，但它懂得自我保护，知道自己不用搏斗，无须作战就能伤害敌人。刺猬的力量很小，行动也不灵活，在受到攻击时，它不仅无法反抗，也无法逃脱，但大自然赋予了它一副坚硬的带刺盔甲——受到攻击时，它会迅速把身体缩成一个圆球，这样身体的各个面就布满了防御和攻击性兼具的锐利武器，让敌人无从下手。敌人纠缠得越厉害，它就蜷缩得越紧，浑身的刺也就会越锐利。另外，刺猬在害怕时产生的本能反应也能自卫：它散发着浓烈臭味和潮气的尿往往让敌人退避三舍。当狗撞见刺猬时，大多都只会吠叫示威却很少去捉它；也有一些狗比较狡猾，能像狐狸一样找到方法打败刺猬，但代价是受伤的爪子和流血的嘴巴。除了狗和狐狸，刺猬并不害怕其他动物，如石貂、松貂、白鼬、黄鼬，也不怕猛禽。

我曾经在花园中饲养过几只刺猬　　，它们并不会对人类造成什么危害，而且也不会让人生厌。它们的主要食物是落在地上的果实，喜欢的运动是用鼻子拱土；也会吃鳃角金龟、金龟子、蟋蟀、蠕虫等小活物；而且，肉也为它们所爱，生熟不论。我们常能在乡村的树林里发现刺猬，老树的树干下、岩石缝中以及田野和葡萄园中的石堆里也都可见它们的踪影。刺猬在晚上活动，能爬上一整夜。天一亮，它们就不动弹了。一般情况下，刺猬不会靠近人们的住宅区域，更喜欢待在干燥的高地，有时候也会在草地上现身。刺猬能够跟人类友好相处，面对人类时不会逃开，也不会伸出爪子或露出牙齿，所以我们能轻松把它放在手心，不用担心它会跑掉；不过，在触碰到它时，它还是会本能地缩成带刺的球状。如果想让刺猬展开，需要把它浸入水中。

刺猬是需要冬眠的动物，没有在夏天储存食物的必要。它们吃得很少，也可以长时间不进食；与其他冬眠动物一样，刺猬也是冷血动物。刺猬的肉质差，口感不好，以前的人们会用它们的皮毛来制作麻刷或者衣刷。

第七节 河狸

河狸筑堤

每到六七月份，河狸就会聚到一个地方，形成一个群体。它们从各个地方赶来，很快就能聚集到两三百只；它们聚集的地方就是它们的居所，大部分是在水边。如果居住地水面平稳，有一定的高度，比如平静的湖水边，那河狸就免去了筑堤的麻烦；但要是居所边水流湍急，水位涨落变化较大，它们就必须筑堤截流，才能形成一个比较平稳的池塘或者水域。它们筑造的河堤就如同一道横穿河流的水闸，河堤底部的长度约为27米到33米（80尺到100尺），厚度大约是3米到7米（10尺到20尺）。相对于河狸的体形来说，筑造这样的河堤是一项非常浩大的工程，需要付出的艰辛劳动可想而知。此外，这项工程的坚固性也是必不可少的，河狸筑堤的地方常选在河水较浅的地方，如果河边刚好有倒向河面的大树，它们就会啃断这棵树，用之建造堤坝。它们会挑选大约有

两个人的身躯那么粗的大树，只是用四颗门牙进行啃咬，而不借助于其他任何工具。它们先将树根啃断，并控制树倒下去的方向，尽可能让倒下去的树横穿河流，再啃掉树上的树枝和树杈，让树变得光滑，各个位置的支撑力是平衡的。

既然是一项浩大的工程，一只河狸的力量肯定做不到，需要许多河狸分工合作：协力将树啃倒之后，会有几只河狸一起啃树枝和树杈，其他的河狸则在河岸边忙碌，把那些跟人小腿或者大腿一样粗细的小树的树杈啃掉，在一定的高度上啃倒，用来做木桩。接着，这些木桩被河狸们运到河中，再通过水路运到筑堤的工地上，把木桩做成连在一起且入地很深的桩基，最后再把树枝缠在木桩之间。这是多么艰难的工作啊！因为需要将木桩竖起来，让木桩与河底垂直，所以必须让木桩贴着河岸或横在河上。河狸们会用嘴叼住比较粗的一端；同时，进入水中的其他河狸会在水底刨洞，将细的一端插到洞中，这样木桩才能立起来。当一部分河狸在做这项工作时，另一部分河狸会去寻找泥土，用脚往泥土中加水，搅拌成稀泥，再用尾巴将稀泥打紧密，最后用嘴和爪子搬运大量泥土，去填充木桩的缝隙。桩基由几排木桩组成，它们竖直排列且高度相同，从此岸一直延伸到彼岸，各个地方都堆满了泥土。河水流过来的那一边，树桩处于垂直状态；而支撑树桩的一边则是倾斜的。所以堤坝底部的宽度达3米到7米（10尺到20尺），而顶端的宽度仅仅1米左右。如此，既保证了足够的空间，又非常坚固，还能最大限度地蓄水、拦水、承受水的重力、分散水的冲击力。河狸会在最薄弱的堤坝顶端斜着挖两三个排水口，随着河水的涨落，进行扩大或者缩小。当遇到特大洪水时，堤坝就会出现缺口，但水位下去之后，河狸会迅速将缺口修补好。

河狸的习性

河狸通常喜欢把仓库建造在河边住所的旁边。每个河狸家庭都有与其数量相对应的仓库，所有的河狸共享权利，从来不会到彼此的仓库中抢夺东西。有人曾经看到过一个生活着二十几户河狸的河狸群落，这种大规模的河狸定居点实属罕见，一般情形下，河狸群落大约由十几户组成。每个河狸群落中，单独的家庭都有自己的住所、仓库和活动空间，

它们绝不允许外来者进入自己的家园。通常，一个河狸家庭中会有2个、4个或6个成员，大一些的家庭会有16个或18个成员，最大的家庭据说会有30个成员。河狸家庭成员的数目几乎都是偶数，而且雌性和雄性的数量相等。大致统计一下，一个河狸群落一般会有150～200个成员。

尽管河狸群落的成员数量多，但它们内部的关系很和谐。共同的劳作加强了它们之间的联系，将它们团结在一起。它们在共同创造的舒适环境里聚集，共同储存并享受大量的食物，群居生活的方式有力地维系着这种团结。河狸的胃口不大，也不挑剔食物，对血腥肉食的反感使得它们不会产生掠夺或斗争的念头。它们享受着自然界其他动物难以得到的幸福，彼此亲密无间，懂得避开敌人的挑衅；遇到危险时，河狸会用尾巴击水发出报警声，声音在沿河的所有住所上空回荡，听到报警声的河狸会采取行动，有的潜入水中，有的在洞内藏身。河狸建造的住所四壁坚固，除了闪电和人类的武器能对之造成威胁，其他动物基本没有办法攻入这些住宅。河狸的住宅安全且整洁：地板由绿色的枝条铺满，是舒适的地毯，丝毫不乱，异常干净；靠水的一面是它们的凉台，白天的大部分时间河狸都会在那里待着，乘凉、沐浴，将下半身浸泡在水中，头和上半身直立在水面上。有时，它们也会出现在离住宅较远的冰层下，这是捉捕它们的好时机：只要先从一侧攻击它们的住所，之后在冰层上凿开一个窟窿，守候在旁边，就能轻易地抓住它们，因为河狸必须到开口处呼吸新鲜空气。

夏初，河狸会聚集到一起，在七八月份的时候建造住所；到了九月份，它们就开始储存树皮和树枝；接下来的日子，它们尽情享受劳动成果，悠闲地生活。秋冬是河狸休息和恋爱的季节，它们通过共同劳作相互认识并产生好感，然后结为夫妻。河狸间的结合不是为了繁殖后代，更不是一种偶然，它们是因彼此喜爱才选择在一起共同生活。河狸夫妇会一起度过秋天和冬天，悠闲地待在家中，偶尔外出散步或把自己喜欢的新鲜树皮带回家。据说河狸的怀孕期有四个月，在冬季末生产，通常每一胎产崽两三只。在此期间，河狸爸爸会离开住所，到田间去享受春天的温暖以及鲜美的水果。它们虽然时常回家，但不会住在家里。河狸妈妈则负责在家养育河狸宝宝，几周后，河狸妈妈便会带着宝宝们外出。它们在露天环境中居住，一起散步，以鱼虾或者新鲜的树皮为食，

在水上和林间度过整个夏天。秋天来临时，河狸们会再次聚到一起。如果夏季的洪水冲垮了它们筑造的堤坝或者住所，它们会更早地聚集，进行修补工作。

第八节 狮子与老虎

狮子

人类对气候的适应能力比动物更强，所受的影响也比较小，不同的气候只是让人类拥有了不同的肤色，如欧洲的白种人、非洲的黑种人、亚洲的黄种人、美洲的红种人只是属于不同的人种。人类将整个大自然视为领地，几乎能适应任何环境，无论是南方的炎热，还是北方的寒冷，都能生存和繁衍。

对动物而言，就不太一样了，不同的气候会对它们产生很大的影响，并表现出明显不同的特征，它们之所以种类繁多也多半出于这个原因。和人类相比，动物之间有非常明显的差别，而这些差别似乎与它们所在地区的气候息息相关：一些动物只能在热带地区生活，一些则只能在寒冷的气候条件下生活，比如驯鹿，它从不在南方地区居住，而狮子从不生活在北方。每一种动物由于生理需要而选择适合自己待的地方，都有自己专属的天然王国。动物之间物种的不同可以说是气候原因造成的。

我们发现，生活在炎热地区的陆地动物比在寒冷或温和地区生活的动物更高大强壮，也更勇猛凶残，这些特点与它们生活地区的炎热气候密不可分。哪怕是同一种类，在非洲或印度烈日下生活的狮子，会比其他地区的狮子更凶猛强悍，也更可怕，如生活在贝尔杜格里德或撒哈拉的狮子，与常年生活在冰雪覆盖的阿特拉斯山山顶的狮子比起来就要勇猛、凶残得多；生存在酷热沙漠中的狮子，是旅行者最痛恶的动物，它们长期祸害与沙漠接壤的区域。不过，它们的数量不多，也似乎在逐年减少，据在这一地区四处游走的人们证实，那里现在的狮子明显没有之前多了。这种强大凶猛的动物能够猎食其他所有的动物，但自己却不会

成为任何动物的猎物，因此，这些狮子数量的减少很有可能与人类数量增加有关，毕竟，即便是力量强大的百兽之王，在足智多谋的霍屯督人或黑人的面前，它们还是弱者。

人类的力量和科技优势可以摧毁的不只是狮子的力量，还能令其崩溃，丧失勇气。在撒哈拉广袤的大沙漠、塞内加尔和毛里塔尼亚边境之间以及霍屯督地区北面等荒无人烟的地方，加上非洲和亚洲的南部地区，依然生活着为数众多的狮子，它们保有自然赋予它们的本色：习惯于攻击任何动物，并常常取得胜利。在这样战则获胜的习惯中，它们变得更加顽强和凶悍。它们对人类的力量知之甚少，所以也不会畏惧人类，在还没有领教过人类武器的威力之前，也想要与人类一争高下。虽然对抗中的受伤会使它们发怒，却不能令它们退却。哪怕是看到大批人马，它们也不会慌张。生活在沙漠中的这些狮子，即便独自一头也敢袭击整个商队，经历一场顽强而激烈的战斗后，狮子尽管疲惫，但不会一下子就掉头逃跑，而是坚持着，边退边搏斗。与此相反，在印度和柏柏尔人城邦或小镇生活的狮子，在验证过人类的力量后，它们已经勇气尽失，甚至在听到人类威胁性的吆喝声时就会变得温顺，它们不敢再向人类发起攻击，只会袭击小牲畜。一旦遭到棍棒击打，便放弃猎物一逃了事。

狮子天性的这种变化和驯服，也清楚表明，它是能够记住人类留给它的印象的，而且能够一定程度上被驯化，从而接受某些程度的训练。这也是历史故事中之所以出现拉着凯旋之车的狮子或被迫进行战斗的狮子的原因，它们对自己的主人忠心耿耿，以为主人奉献自己的力量和勇气以对付敌人为荣。我们也可以这样认为，如果将捕获到的小狮子和家畜放在一起饲养，它们很快就会融入家畜中。狮子会跟主人亲近，表现得十分温顺和亲密，幼年时尤其明显，即使偶尔也会显露它们凶猛的天性，但很少会攻击自己的主人。狮子的动作勇猛，食欲强大，因此即使被驯养也不能认为一定能百分百消除其野性，如果让它长时间忍饥挨饿或者无故折磨它，将其激怒，会是十分危险的事情。狮子是不能忍受虐待的，如果有这样的遭遇，它不仅会发怒，还会一直记恨并伺机报复。当然，人们对它的好它也会记住，并时刻心存感激。我的记载中有大量具体事实可以引用，或许这其中存在某些夸张成分，但还是有一定真实

性的。这些事例都在说明，狮子的愤怒是很高贵的，勇气也非常崇高，天生注重感情。我们经常看到，狮子看不起卑微的敌人，也无视它们给自己造成的小小伤害，宽恕它们的任性行为；狮子也有沦为俘虏的时候，虽然会烦躁却并不乖戾，反而变得比较温顺，服从主人的命令，舔舐喂食给它的主人的手掌，更有甚者，还会放过那些人类当作食物扔给它的猎物。而且，这种行为似乎让狮子与猎物之间产生了感情，在此后的时间，它们继续这样保护着猎物，与它们和平相处，分享食物，有时还会慷慨地让出全部食物，哪怕自己挨饿也不会终止自己最初的善行。

狮子的外貌与它伟大的内在品质完全符合，有着威严的相貌，坚毅的目光，豪迈的举止，震天的吼声。它的个头虽不及大象和犀牛那样巨大，体重也不如河马或牛，但它的身材匀称而协调，身体没有过多的肉和脂肪，肌肉发达，结实强健，可谓力量与灵活相结合的典范。狮子惊人的弹跳力充分体现了雄健力量，它迅猛摆动的尾巴足以将人击倒在地，脸部特别是前额皮肤的灵活抖动，令它愤怒的表情更加丰富。这样的力量还体现在摆动鬣毛上，狮子愤怒时鬣毛不仅能竖起，还能向各个方向摆动。

狮子在饥饿时，会正面袭击路过的所有动物，因为它强大的力量令其他动物畏惧，所以都会选择尽量避开它，以至于它不得不把自己藏起来，静候攻击时机。狮子在林木茂密的地方俯卧潜伏，时机成熟便会奋力扑向猎物。在沙漠和森林中，羚羊和猴子是狮子通常的食物，只是猴子如果在树上，狮子是没办法捕捉到它的，因为狮子没有老虎或美洲豹那样的爬树能力。狮子食量很大，一次性进餐能吃下很多，以保证两三天不进食。它的牙齿坚固有力，轻易就能嚼碎骨头再和肉一并吞下。据说狮子能够长期忍受饥饿，但由于体温很高，不耐饥渴，见到水就会停下来大喝一次。狮子喝水的方式跟狗很像，唯一的不同之处是，狗在喝水时舌头向上卷，而狮子的舌头则是向下卷，所以它喝水时需要花费很长时间，还会漏掉很多水。狮子喜欢吃鲜肉，特别是刚被杀死的动物肉，一头狮子每天大约需要吃7.5千克生肉。它不喜欢食用有腐臭气味的肉，宁可花时间去追新的猎物，也不会食用现成猎物的残存尸体。尽管这样，狮子仍然有很重的体味，尿味也非常难闻。

狮子的吼声嘹亮而有力，在沙漠的寂静夜里，它的吼声如同雷鸣般

响彻四周。它在愤怒时，叫声不太相同，突然而短促，而且不像吼声那般轰鸣。狮子每天都会吼五六次，下雨天尤其频繁。狮子愤怒时的叫喊比它的吼声更加令人恐惧，它的尾巴会在这种时候左右摆动，击打地面，长的鬣毛随之飘飞，面部皮肤抽动剧烈，眉毛上下抖动，露出利齿，伸出带刺的舌头。事实上，就算没有利齿和爪子的协助，它也足以将猎物剥皮破肉。它的头、颚以及前腿比后半身要强壮很多。它的眼睛跟猫一样能在夜晚看清四周的东西；它的睡眠时间很短，而且很容易被惊醒。但是对于说狮子睡觉时是睁着眼睛的这一点，我认为是没有依据的。

狮子的日常步态哪怕总是倾斜着，依然高傲、庄严而舒缓，它跑起来的姿势不太平稳，也非匀速，而是以跳跃的方式，所以非常迅猛，不易瞬间停下，这也是狮子在追赶猎物时总会越过它们的原因。它在扑向猎物时会跃起十来步，扑到猎物身上，先用前掌按压住对方，再用趾甲撕扯、用牙齿啃噬。狮子年轻时健壮而行动敏捷，很少离开栖身的荒漠和丛林，那里有足够供它们饱食的猎物；但是随着年龄增长，身体变得笨重，不那么容易捕捉猎物时，狮子会开始接近人类居住的地区，威胁人和家畜的安全。有一点很奇特，如果人和其他动物同时出现在狮子的视野中，它通常都是先扑向动物而不会扑向人，除非是人先攻击它。狮子的辨识能力超群，如果它发现面前的曾经是伤害过它的人，就会放弃猎物，转而扑向仇敌。据说，狮子喜欢骆驼肉和小象的肉，胜过其他一切肉。小象在象牙还未长出来前，根本不是狮子的对手，如果母象不及时赶来援救，狮子轻易就能攻击成功。除了大象、犀牛、老虎和河马，其他动物基本都是狮子的手下败将。但无论狮子如何勇猛，人类也不会放过它，总是带着高大的猎犬，骑在马上对它们进行猎捕。人们利用猎犬和马对狮子进行围撵，迫使它后退，但前提是事先训练好猎犬和马，因为狮子的浓烈体味会让未受过训练的动物一闻到就战栗而逃。狮子的皮毛虽然很坚实，但抵挡不了子弹的威力，甚至连投枪也能直接插入进去，只是要想一枪将其毙命也是困难的事，人们常常通过设计陷阱来猎捕狮子，如同捕狼一样。一旦被人们捉到，狮子就会马上变得温顺，在它还惊魂未定时，人们可以顺利地用嘴套套住它的嘴，随心所欲地牵着它到处走。

老虎

正如我们前面所讲，狮子具备了丛林之王的豪迈勇猛，大度高贵。与之相比，老虎却是卑劣残忍和凶狠的，因此它的可怕程度要比狮子高多了。狮子时常会忘记自己百兽之王的强者地位，它前进时安详的步伐，对人类从不主动攻击，除非先被挑衅；它只会在受到饥饿威胁时，才加快步伐奔跑，猎捕食物。老虎则完全不是这样，它即使吃得很饱也难改嗜血如命的本性。老虎的狂烈性格唯有在它需要设圈套捕捉猎物时才会稍稍收敛；它能狂暴凶狠地捕获并撕咬完一个猎物后，立即扑向下一个新猎物；它为祸一方，将栖身之地掠劫一空，毫不惧怕人类，也不会在武力面前示弱；它屠杀家畜群，也不放过野兽，袭击小象、小犀牛，甚至偶尔在狮子面前耍威风。

通常情况下，体形与天性是有一致性的，狮子的身体与腿的长度正好成比例，仪表中有着高贵的气息：茂密的狮鬣覆盖着肩部，目光坚毅，举止庄重。而老虎却是体长腿短，脑袋平而秃，目光呆滞，总是伸在嘴外的舌头血红血红的，永不满足的残暴特性显露无遗。时刻都欲爆发的狂怒似乎是老虎的本能，盲目而乖戾。雄性老虎在盛怒之下，连幼崽也会被它吞噬，甚至撕碎想要保护孩子的雌性虎。这是大自然中少见的有这样特性的物种。

老虎对炎热气候的适应性很强，似乎生来就如此。尽管这样，在马拉巴尔海湾，孟加拉国等地，经常会有老虎出没于江湖岸边，这是因为嗜血的本性令老虎饥渴，它需要通过饮水来稀释可能使他筋疲力尽的燥热。同时，这些地方也为老虎的狩猎提供了方便。炎热的气候中，其他动物饮水的次数增加，也常常来到水源地，而老虎就在这里等待。老虎对猎物的捕杀是反复进行的，它总是会扔下刚被其杀死的猎物，转而再去屠杀进入它视线的其他的动物，它仿佛沉迷于享受捕杀的快感中，撕裂猎物，吸食它们的血。如果它捕杀的是马、牛这样的大型动物，一旦感觉有不安全的因素存在，它不会当场将其开膛破腹，而是把它们往森林中拖拽，以便能更自在地将猎物撕成碎块。但即使是拖着这些大身型的猎物，老虎的奔跑速度也不会因此而变得缓慢。

老虎可能是少有的、不愿意委屈自己去改变天性的动物，它们不惧

武力威逼，软硬不吃，很难驯服。人类温和举止所具有的功效通常能感化多数生灵，唯独面对老虎的刚硬个性，有些束手无策。其他野兽的兽性受气候的影响会有所缓解，但却缓和不了老虎的暴脾气；它不会判别伸过来的手是要喂它食物还是要击打它，所以一律张口就咬；它会朝着所有的生灵咆哮，在它眼中任何一种动物都是潜在的猎物，都被它投以贪婪的目光，恨不得一口吞下。虎躯震动，磨牙霍霍，发出威胁恐吓，然后猛扑过去，铁链和栅栏能阻止的只是它的行动，却无法平息它的愤怒。

第九节 豺与熊

豺

　　狼与犬非常接近，豺则是介于这两者之间的动物。贝隆（编译者注：法国著名博物学家，生于1517年，卒于1564年）曾经说，豺是介于狼犬之间的兽类，它同时兼具了狼的凶残性和犬的随和性，它发出的嗥叫声夹杂着犬吠和呜咽，它比狼更贪婪，又比狗还喜欢狂吠。豺从不独行，而是二三十只甚至更多只结群而行，它们常常在捕猎中抱团发动攻击，它们以各种小动物为食，偷袭人类养殖的各种家畜家禽，甚至无所顾忌地独闯羊圈和牛栏马厩；倘若实在没有别的东西果腹，它们连马鞍或是长靴上的皮革也会吞食；如果捕食不到活物，它们还会将动物或人的尸体挖出来，因此人们在掩埋时必须夯实墓地的泥土，但只有一两米厚的泥土是无法阻拦它们的，还需要在泥土里掺入粗壮的荆棘，以阻止它们的挖掘。豺在挖掘坟地时常常是几只一起合作，一边掘土一边发出凄厉的嗥叫。等到它们习惯了食用腐尸后，就会不断奔走在墓地间。豺还会跟踪军队、袭击商队，它们好似四足兽中的乌鸦，腐臭味再重的肉它们也喜欢，食欲强烈，任何皮毛或者脂肪，甚至动物的粪便它们都吃，就算是干瘪的皮革都能成为其佳肴。

　　鬣狗也是腐肉的爱好者，也会挖掘尸体，它在习性上与豺一致，所以虽然两者是截然不同的两种动物，但常常有人将它们混淆。鬣狗是独居动物，极少聒噪狂吠，跟豺比起来，它要强壮很多，野心也更大，但

因为它只是食用尸体，并不攻击生者，所以不像豺那样令人厌恶。豺的嗥叫以及偷盗、暴行都是所有旅行者所憎恶的。鬣狗和狼的卑劣都集中在了豺的身上，是两者丑陋一面的集大成者。

熊

熊是独居性野生动物，性情野蛮、孤僻，出自本能地远离所有群体，生活在人迹罕至的地方，只有最原始最自然的环境，才能令它安心。因此，它常将陡峭山谷中的岩穴或是密林中的老树洞作为自己的巢穴，独自隐居在里面，就算没有充足的食物储备，也不贸然出动，而是在巢穴中度过寒冷的冬天。

熊发出的是一种低沉的吼叫声，粗哑深沉，常常伴随着牙齿的震颤，特别是被人或其他动物激怒时。熊很容易愤怒，这种愤怒的表现往往出于任性的狂暴，因此，即使被人类驯化后，显得温顺和听话，却不得不时刻提防它，在对待它的时候小心翼翼，尤其不能触碰它的鼻尖。

熊被驯化后，人们可以教会它站立、做手势，甚至跳舞，某些聪慧的熊似乎还能听懂乐器的声音，从而跟着节奏摆动身体。但是要对熊进行这样的训练，人们必须从其幼年开始，并持续下去。驯化成年熊是很困难的事，因为它会非常顽固，而且畏惧之心也减弱，甚至不再害怕人类。但熊是容易受惊的动物，据说猛然间听到人们的呼哨声，它会大吃一惊，继而停下脚步站立起来，这时开枪最易令其毙命。但是若没能将它击毙，它在惊恐之后爆发的力气更大，会直扑向射击者，用前肢紧紧箍住对方；假如没有救援，袭击者会被它掐死。

熊的听觉和触觉很发达，它的眼睛与其庞大的身躯比起来虽然小许多，但其视觉也是不错的。熊的嗅觉非常灵敏，远远超出了其他动物，这是由它奇特的鼻腔结构决定的。熊的鼻腔内有四排骨质薄片，三个垂直平面将这些骨质薄片分割开，扩大了接受气味的面积。熊的皮毛浓密厚实，四肢非常强壮，手指和脚趾大而短，彼此之间紧密相挨；熊在与对手搏击时是会挥舞拳头的，这些都是与人类有些相似的地方，但这并代表它就比其他动物高级多少。

第十节 象、犀牛与骆驼

象

象可能是除了人类外，自然界最壮观的生物，它有超过一切陆生动物的体形，又有接近人类的智力。

即使是野生大象也不凶残，相反它天性温顺，从不滥用武力，只有在保护自身或同类时才会使用它的“武器”。象是群居动物，通常结伴行动，很少见到它们离群独行。走在队伍最前端的总是年长者，稍微年轻些的则走在队伍后面，队伍中间是受保护的年幼和体弱者。这种行进序列通常只在它们觉得危险的行程中或是到耕地上吃东西时才如此保持，在开阔的草地或森林中散步或是旅行时就不会这样小心翼翼了。它们之间会保持一定的距离，但相隔不会很远，以方便遇险后能互相救援。总有一些象会因为落于团队之后或走失，从而成为猎人袭击的目标，但猎人如果试图攻击整个象群，若没有一支有装备的小部队是不可能达成的。冒犯象群是一件十分危险的事情，它们会猛然扑向袭击者，它们庞大的身体看似笨重，但步伐却一点都不会受阻，轻易就能追上跑得最快的人。它们用坚利的牙齿攻击，或是用长长的鼻子将袭击者卷起来，再扔下去，用巨大的脚踩碾，结束对手的性命。不过，这样的情况只发生在它们被激怒时，它们不会毫无缘故地主动发起攻击，也不会随意伤害没有招惹自己的人。象对于伤害十分敏感，所以人们千万不要试图去挑衅它们。对于经常出入象群活动地带的旅行者，需要在夜里露营时燃起篝火，使劲敲打货箱，让象群不敢靠近。据说大象是有记忆的，如果曾经被人袭击或掉进过人们布置的陷阱，会一直介怀，并随时伺机报复。

野生大象的鼻子很长，因此嗅觉比其他动物更加灵敏，能嗅到很远的地方传来的人的气味，并能根据气味轻易追踪到人的踪迹。有古书记载，大象会用鼻子拔下猎人经过地方的草，借此向同类传递信息，让象群中所有的象都知道敌人的踪迹。象喜欢在河岸、深谷、绿荫和湿润地带生活，水源对它们而言至关重要。象在喝水时总会先将水搅浑，再用象鼻吸满水，最后把水送进嘴里饮用。象无法承受严寒，也不能忍受酷热，为了躲避炽热的阳光，它们尽量生活在森林深处；它们也经常在水

里泡着，身躯的庞大并不会有什么影响，反而有助于它们在水中游泳，尽管它们无法深入水下，但靠着高高竖起的长鼻子呼吸，它们也一定不会溺水。

象的食物通常是树根、草叶和嫩枝，偶尔也吃水果和种子，但肉和鱼类不是它们的所好。象也不是独食者，如果某只象发现一片水草丰美的牧场，便会马上呼唤同伴与自己一起分享。大象对草料的需求很大，所以会经常换地方。如果它们闯入田地里，会对田地造成极大的破坏。被它们庞大而沉重无比的身体践踏的植物或庄稼，往往是它们吃下的十倍以上，加之它们往往成群而至，一小时不到的时间就足以毁掉整块庄稼地。居住于野生大象出没地区的印度人和黑人深受其害，因此总是用尽一切办法赶跑它们，比如制造巨大的声响或燃起熊熊篝火等。就算采取了这样的防范措施，象群依然经常占领耕地，撵跑家畜，有时甚至会彻底掀翻简陋的住宅，把人也赶走。象不懂什么是害怕，唯一能够让它们停下来的方法就是向它们扔爆竹，爆竹突如其来的炸响和光亮通常可以对它们起到震慑作用，有时还能让它们掉头跑掉。象群在一般情况下不会被拆散，因为它们总是站在同一阵营，十分默契，无论进攻还是后退，都是一起行动。

象只要被人驯化，就会变得非常温和、柔顺、乖巧。它会依恋照料它、抚摸它、给它喂食的人，而且能够看懂人的手势，甚至能听懂人类的语言，还能分辨出人类的情绪，如愤怒、悲喜、满意等。它的行动很有条理，对主人的命令很少误解，专心听从吩咐并谨慎地执行；它稳重而节制，能轻易学会屈膝，便于人们骑到它背上；它用鼻子摩擦人以示亲近，也以鼻子致敬，还能用它举起重物；它对于人类给自己披挂衣物毫不反感，而且似乎很喜欢自己身上的金鞍。人们用套索将它套住，然后拴在货车、船或绞盘上，它就会用力拉，一点都不会气馁。

驾驭象的人通常会骑到它的脖子上，用一个铁器或锥子戳他的耳根附近，指挥它拐弯或加快行进速度。一般情况下，只需要人们下命令就好，特别是得到了它的信任的主人，它对主人的依恋之情是很深切的。象的感情极为深厚，所以不会愿意为陌生人效力，我们还看到过大象因一时愤怒而误将照料自己的主人杀死后，绝食而亡的情况。

犀牛

犀牛是在力量上仅次于大象的四足兽，位列第二。犀牛有着庞大的身躯，从嘴部到尾部的长度至少有5米（15尺），高度超过2米（6尺），躯干的周长与身体的长度差不多相等。因此，从体形和重量来看，犀牛与大象的相似度很高，但在人们眼中，总是认为犀牛的大小相比大象逊色很多，这是因为按身体比例，犀牛的腿比不了大象的腿长，视觉上也就远远小于大象了。

尽管在体形上和大象有一拼，但在本领和智力方面，大象把犀牛远远甩在了后面。犀牛虽然具有四足兽的通常特征，但皮肤不敏感，也没有手之类独立的触觉器官。它没有象鼻那样的长鼻子，比较灵活的只有两片嘴唇，所以它的灵敏性比较差。犀牛优于其他动物的地方是它的力量和身躯，再有就是鼻子上竖起的坚硬的犄角，颇具攻击性。犀牛的犄角位置与反刍动物犄角的位置相比更加有力，反刍动物的犄角通常只能保护到它们的头部和脖子上部，而犀牛的犄角可以将嘴的整个前部保护住，包括鼻子、嘴巴和脸部，在对抗时不会受到对手的攻击。这也是老虎宁愿选择攻击大象，也不愿轻易去攻击犀牛的原因，犀牛的坚硬犄角会让它面临被开膛破肚的危险。

除了犄角，犀牛还披着一身的“甲胄”——身体和四肢外面包裹着一层坚硬无比、连刀枪也不易穿透的皮，因此猎人的铁器和火器对犀牛的威胁不大，虎爪和狮爪就更不在话下。犀牛的皮肤黝黑，颜色类似于大象，却比大象皮肤厚得多，也硬得多；蚊虫的叮咬对大象会造成困扰，但犀牛没有这样的烦恼，它身上的皮是不会缩皱的，褶皱只出现在颈部、肩部和臀部的皮上，这种结构的最大好处就是它的头部和腿部的运动较为灵活。犀牛的腿部粗壮，脚上两只爪子巨大。从身体的比例来说，犀牛的头部比大象的头部长，但它的眼睛比较小，而且总是处于半睁开的状态；犀牛的上颚盖过下颚，上唇移动的幅度很大，能拉到超过20厘米，嘴中央还有一个尖尖的由肌肉纤维构成的东西，这让它的嘴唇发达而灵活；似乎是发育不太完全的手或者鼻管，可以触摸抓握物体，与人手或者象鼻有类似功用。象的防御和攻击工具是它长长的牙齿，而犀牛最好的武器就是它的犄角和四颗锋利的门牙。在4颗门牙之外，它还有24颗臼齿。犀牛的耳朵是总是笔直竖起，形状和猪的耳朵相似，只

是相对于它的身体，这耳朵显得非常小；犀牛的耳部也是它唯一一个有鬃毛的身体部位。与大象的尾端一样，犀牛的尾端也有一束很结实、很坚硬的粗鬃。

犀牛习惯吃粗草、带刺的灌木等，这些粗粝的食物比牧场中鲜美的嫩绿青草更受到犀牛的青睐；它还喜食甘蔗和种子，但对肉类不感兴趣，所以它对小动物是不会造成威胁的。另外，庞大的身躯和厚实的皮也让它不畏惧大型动物，能与老虎这样的猛兽和睦相处，老虎在它面前也不敢造次。犀牛并非群居动物，也不会聚集在一起行动，它们的性格是有一些孤僻的，有较强的野性，很难被猎捕和驯服。一般情况下它们不会主动攻击人类，但一旦受到挑衅，它们会变得异常愤怒，而且超级恐怖。犀牛的皮厚而坚硬，哪怕是大马士革利刃（编译者注：世界三大名刀之一，原产印度，由乌兹钢锭制成，表面有铸造型花纹的刀具）和日本军刀都难以刺破，标枪、长矛等也扎不进去，甚至火枪子弹都伤害不了它；铅弹碰到它的皮会被撞扁，铁制的柱形子弹同样无法穿透。对于穿着这样一身“铠甲”的犀牛来说，薄弱的部位是腹部、眼睛和耳朵周围，有经验的猎人不会与它发生正面冲突，而是远远跟踪，等到它歇息或是睡觉时暴露出弱点后再进行偷袭。

骆驼

相比象和犀牛的强壮，骆驼的体形看起来有些怪异，背上耸起的驼峰使它稍显畸形。骆驼被阿拉伯人认为是上帝赐给他们的礼物，所以骆驼对他们而言，是非常神圣的动物。假若离开了骆驼，阿拉伯人的生存会成难题，不仅是失去了重要的交通工具，也无法进行正常的贸易活动。骆驼奶是阿拉伯人不可或缺的必备食物；骆驼肉，特别是小骆驼肉，也是阿拉伯人的盘中佳肴；而骆驼的毛更是能为阿拉伯人带来很大的经济收益，骆驼每年都会换一次毛，驼毛又细又软，阿拉伯人将其制成衣物或者布置房间的织品。

综上所述，骆驼的存在，不只是令阿拉伯人衣食不缺，更是让他们无所畏惧。骆驼一天在沙漠中可以前进200千米，任何一支进入沙漠的军队，如果想要追赶阿拉伯人，都可能陷入失去生命的危险中，因此，阿拉伯人只有在自愿的情况下才会被征服。但是，贪婪之心永无止境，

这些阿拉伯人尽管生活安定自由，甚至非常富裕，却欲壑难填，用罪恶来玷污沙漠。他们穿过沙漠，前往邻近国家抢夺奴隶和财物，利用骆驼给予他们的便利实施掠夺。阿拉伯人以抢劫为乐，他们的恶行几乎从未遭遇过失败，哪怕邻国的力量比他们强大，却总是无可奈何地让他们逃脱，让他们不受任何惩罚地将掠夺的东西带走。

一个阿拉伯人如果试图去做陆地强盗，他很快就能学会忍耐旅途中的辛劳，一方面，尽可能减少睡眠的时间，让自己习惯忍受饥渴和炎热；另一方面则是训练骆驼。阿拉伯人在骆驼出生后不久就开始了对它们的训练，迫使它们蹲下并伏到地上，将重物放到它们背上，它们习惯于托运重物，接着再换上更重的东西，逐渐增加；在骆驼口渴或者饥饿时，并不会马上给它们水或者食物，而是调整它们的吃喝时间，慢慢拉长两餐之间的时间，同时减少食物的供应量。等到骆驼稍稍强壮，就开始训练它们的奔跑能力，将马作为参照物来刺激骆驼，以达成让它们跑得像马一样快的最终目标。当骆驼的饮食得到控制，力量和奔跑速度也都得以提升之后，训练者就让它驮着能维持自己和骆驼生存所需的食物，前往沙漠边缘对过往商人或者边远地区的居民实施抢劫，抢来的东西也依然让骆驼驮着。如果遭遇反击，这些人会选一匹跑得最快的骆驼立即逃跑，日夜兼程，几乎不歇息，一周的时间大约就能跑300千米。在这段赶路的时间，骆驼驮着东西一直奔跑，每天的休息时间只有一个小时，得到的食物只是一个面团。骆驼能够连续奔跑十几天，如果没有水，它可以不喝；但如果闻到水的气息，它会迅速向水源靠近，一次把水喝够，以应付接下来的整个旅程。骆驼常常需要维持几个星期的长途旅程，所以它们在饮食方面的节制时间也和旅途一样长。

第十一节 斑马、驼鹿与驯鹿

斑马

斑马是四足动物中体形最好、外表最优雅的，它有着马的外形和气质，又有鹿的轻盈和灵活。身上布满的黑白相间的条纹，匀称而有规律，仿佛是大自然用尺子和圆规描绘出来的一般。这些黑白相间的条纹

相当奇妙，相互平行，彼此间的间隔又极为规则，犹如一块花格子布料。这些条纹不仅存在于斑马的身上，它的头部、颈部、大腿、小腿，甚至耳朵和尾巴上也都有，远远地看过去，斑马的全身似穿着一件黑白相间的条纹套装，满身的条纹细带随着体形的不同而变化，时而宽时而窄，勾勒出它肌体的轮廓。

准确地说，黑白相间的条纹通常出现在雌斑马身上，雄斑马身上的条纹是黑黄相间的，但两者的色彩都非常鲜艳并闪烁着光泽，使斑马看起来更加耀眼。斑马的体形比马小一些，比驴又要大一些。我们常常拿马或者驴与斑马进行比较，有时也会将斑马称为“野马”或者“有条纹的驴”，但是，我们一定要知道，它们不是马或者驴的变种。自然界中的各种动物都是独一无二的，每一种类都有自己的发展史，斑马既不是马也不是驴，它就是独一的物种。虽然人类一直尝试让斑马与马或者驴亲近，但仍然无法实现它们之间的杂交或繁殖。

驼鹿与驯鹿

我们把驼鹿与驯鹿放到一起，并非因为它们是相同的动物，而是因为两者的发展历史相互渗透，较难完全区分。仔细对比驼鹿与驯鹿，就会发现这两个品种之间存在的不同之处：体形上，驼鹿要更大、更粗壮一些，腿长，脖子短，毛要长一些，而脚要宽一些、粗一些，角宽大；驯鹿则是又矮又壮，腿粗短，蹄子宽大，毛浓密，角长而多分叉，末端宽大，与人类的手掌相似。

驯鹿和驼鹿的颈项下方都长着长毛，尾巴却比较短；它们的耳朵与鹿的耳朵相比要长得多。它们前进的方式类似于狍子和鹿，也是跳跃式的，非常轻盈；速度与狍子或者鹿差不多，很长时间内不会疲惫，有时能够连续奔跑一两天。驯鹿生活在山上，而驼鹿则生活在低洼地带或者森林中。它们和鹿一样是群居动物，习惯结伴而行；它们都能被驯化，但驯鹿比驼鹿更容易驯服。驼鹿和鹿都更热爱自由，而驯鹿则被驯化成了最原始的民族拉普兰人的家畜。对于拉普兰人来说，驯鹿是他们唯一的家畜，因为他们生活的地方气候恶劣，只有斜阳照射，白昼和黑夜的长短随着季节有所变化，从初秋一直到第二年的春末，一直都是大雪纷飞。就算到了夏天，荒野中也到处是荆棘，唯一的绿色植物是刺柏和苔

藓。这样的环境是其他家畜无法生存的，牛、羊、马这些对人们的生产生活起着重要作用的家畜，在这里找不到适合的食物，更没有适合它们生存的环境。因此，拉普兰人只能在森林中寻找更容易驯化的生物，比如鹿、狍子之类的动物，以替代牲畜成为新家畜，满足人们的需要。

驯鹿的例子让我们体会到大自然的慷慨，它为我们提供了太多的资源，这些资源的庞大常常超乎我们的想象。大自然向人类提供了牛、羊、马等动物，人们驯化它们，将它们变成了家畜，为人们提供服务和衣食；拉普兰人的生活环境虽然不适宜饲养牛、羊、马等家畜，但大自然赐予了他们驯鹿这一奇妙的物种，让他们得以将之驯化成新的家畜。我们可以再次对两者进行细致比较，将会发现驯鹿的作用强于其他家畜。首先，驯鹿能够拉雪橇、拉车，和马的作用一样；其次，驯鹿奔跑起来更加轻盈，而且轻轻松松就能日行1.5万千米，在冰冻的雪原如履平地；最后，驯鹿的奶比牛奶的营养价值更高，它的肉也很美味，毛皮能制成上等的毛皮制品，而皮也可以制成经久耐用的皮革。因此，在拉普兰人眼中，驯鹿在他们的生产和生活中发挥着重要作用，它以一己之力提供了牛、羊、马等家畜所提供给人类的一切。

第十二节 羚羊

非洲是羚羊，尤其是大羚羊分布最为密集的地区，印度次之。与其他羊相比羚羊要厉害凶猛得多，我们可以根据它们犄角的两个弯和身体两侧底部的黑色或棕色的条纹对它们进行识别。羚羊和鹿有着几乎一样高大的身材和外表，犄角黝黑发亮，腹部雪白，后腿比前腿长。

阿尔及利亚特莱姆森、杜格莱、杜泰尔和撒哈拉等地区也生活着羚羊，这些地区的羚羊爱干净，喜欢睡在干燥整洁的地方；它们奔跑起来姿态轻盈，速度快，警惕性也极高。身处旷野之地时，它们会时刻注意四周的动静，长时间观望，只要感觉到猎人、猎犬或其他敌人的存在立刻就会逃跑。尽管这让它们看起来天生胆怯，但它们身上也有着特别的勇气，在受到攻击时不会躲避，而是停下来，无所畏惧地面对进攻它们的敌人。

羚羊的眼睛大而有神，目光深邃又不失柔和，东方谚语中因此将女人的美丽眼睛比喻为羚羊的眼睛。大多数羚羊的腿比狍子更加灵活，动作也就更轻盈，而且羚羊的毛也比狍子的要短，柔顺又具有光泽；羚羊的后腿比前腿长，这一点和野兔相似，因此也是上坡比下坡更容易。羚羊轻盈敏捷的步态与狍子比有过之而无不及，只是狍子前进的方式是跳跃式的，而羚羊通常是匀速奔跑。大部分羚羊的背部都是浅黄褐色的，腹部雪白，身体侧面还有一条棕色带子，恰好将背部和腹部的颜色隔开来。羚羊的尾巴长短不一，但都长满了黑黝黝的长毛；它们的耳朵直立着，而且很长，中间则较宽大，顶端呈尖角状。羚羊是叉蹄动物，和绵羊类似；无论雄羚羊还是雌羚羊，头上都长着犄角，这一点又与山羊很像，只是雄羚羊的角比雌羚羊要粗壮，而且要长得多。

第十三节 河马与貘

河马

尽管河马的身体和犀牛一样粗壮，但体形要比犀牛稍长，腿也更短些。从身体比例来看，河马的头短而肥大；它既不像犀牛那样鼻子上长角，也不像反刍动物那般头上长角；它在受到苦痛时的叫声和马的嘶鸣相类似，又或是如同水牛的吼声，因此我们根据声音的相似度，为它取名“河马”，就如猞猁发出的吼声与狼相似，我们将其称为“猎鹿狼”一样的道理。“河马”这个名词的另外一个意思是指生活在河里的马。河马的门牙坚硬而有力，尤其是下颚上两颗长长的牙齿，在咬住铁器时会蹦出火花。古人认知中的河马会吐火可能来源于此。河马的门牙是圆柱形的，很长且带有凹槽；尖牙是棱柱形的，又长又弯，很像野猪的獠牙。它的臼齿又与人类的臼齿很是相似，呈现方形或不规则的长方形，而且很粗，每颗牙齿的重量达到了大约2千克，最长的牙齿有0.3米（12英寸），有的甚至可达0.4米（16英寸）长，重量超过5千克。

除了拥有强大的牙齿这一武器之外，河马的力量也是非常惊人的。只是河马天性温顺，加上身体笨重，跑起来非常缓慢，无法与其他四足动物在速度上一较高下，但它在水中游起泳来可比在陆地上行进的速度

快多了。不过，与河狸和水獭不同，河马的脚趾没有膜，它能在水中生活靠的是腹部巨大的容量，同时它在水中待的时间可以很长，在水中行走时就如同在平地上那样毫无阻力。河马以甘蔗、水稻和草根等为食，消耗的量非常大，还会对耕地造成破坏。但是在陆地上，河马遇到危险的系数非常大，这是因为于它的腿太短，在陆地上不能快速逃脱，很容易就被追上。当它遇到危险时会迅速钻到水里，潜在水下游出很长一段距离后才会露面。在被人追赶时，河马通常会选择逃跑而不是反击。但如果先受到伤害，它就会疯狂地冲向追赶自己的船舶，用利牙将船拖住，常常会掀掉船板，有时甚至会令船只颠覆。

貘

我们之前讲过，在美洲大陆上生活的动物，体形似乎都比较小，或者说还未曾发展成为比较大的体积。和古老的亚洲地区生活着的象、犀牛、河马等大个头的动物不同，美洲大陆上生活的大多是如貘、羊驼、小羊驼等体形较小的动物，它们的体形只是那些生活在亚欧大陆上的动物体形的二十分之一。

在美洲大陆上，大自然造物似乎节约了很多的材料，以致这片陆地上生活的这些动物在力量方面存有缺陷。造物主在创造生命时仿佛忽略了它们，或者说它们是造物主造物失败的结果。生存在美洲的动物大部分几乎都没有长牙齿、犄角和尾巴，它们有着奇特的相貌，身体与四肢不相称，比例奇怪，整体不协调。它们中的食蚁兽、树懒等动物生性卑劣，几乎没有行动力和觅食的能力，它们在沙漠的荒凉之地过着萎靡的生活，它们无法在人类居住的地方生存下去，因为在那里，它们完全抵抗不了人类和其他强大的动物，只能面临被灭绝的结局。

貘是在美洲大陆生活的动物中体形最大的，但其体积也只是和一头小母牛或者瘤牛差不多大。貘没有犄角也没有尾巴，四肢也特别短，和猪相似，体形呈弧形；貘在幼年时，跟鹿一样，皮肤上长有花斑纹，成年后则全身变为深褐色。貘的头部又肥又长，长鼻子类似犀牛，上颚和下颚都各长有10颗门牙、10颗臼齿，这是它与其他反刍动物有所区别的最大特点。

貘的性情似乎天生忧郁，喜欢在黑暗中活动，一般夜间才会外出，并且喜欢在水中待着；它生活在沼泽地里，活动的范围也几乎不大远离河边或湖边，一旦感到危险，它会像河马那样，马上潜入水里游出很长一段距离才露面。貘的这个特点让某些博物学家曾经怀疑它是河马的同类，而事实上，貘与河马的差别非常大，只要比较一下我们对这两者的描述，就可以清楚了解。貘虽然生活在水里，却并不以鱼为食物；虽然拥有20颗锋利的牙，却不是食肉动物。植物和草根是貘的主要食物，它天性温顺，也非常胆怯，绝不利用尖牙利齿攻击其他动物，也竭力避开所有争斗。貘尽管体长腿短，但无论是陆地上的奔跑，还是水中的游泳都很快。貘通常结伴而行，甚至是集体行动。它的毛皮十分坚硬、致密，就算是子弹也无法射穿。貘的肉粗糙又淡而无味，但印第安人却十分喜爱。一般来说，在巴西、巴拉圭、圭亚那以及亚马孙河流域甚至整个南美范围内，从智利的边界到新西班牙，都能发现貘的踪迹。

第十四节 羊驼与小羊驼

秘鲁是羊驼真正的故乡，羊驼是那里不可或缺的动物，也是印第安人创造财富的保证。羊驼肉质鲜美，毛也是上等的细绒毛；羊驼终其一生都在为这一地区的运输出力，通常情况下，它们可以驮起75千克的重物，最强壮的羊驼甚至可以承载125千克的货物。在其他动物无法通行的地域，它们也能进行长途跋涉，只是速度比较慢，每天的脚程是7.2万千米（45英里）。羊驼落地稳健，步伐坚实，它们可以在陡峭的沟堑中行走，也可以穿越险峻的山岩；它们通常可以连续走上四五天，然后休息一两天，再重新开始新的旅程。

羊驼的生长速度很快，寿命却很短；它们三岁就可以生育，到十二岁精力依然充沛，但此后逐渐开始衰弱，到十五岁时便彻底衰竭了。羊驼的天性和它所生活的美洲地区的人的性格相似，温和冷静，处理事情很有分寸，懂得尺寸的拿捏。旅途中需要休息时，它们会小心翼翼地屈膝跪下，慢慢放低身躯，以防承载的货物落下来或被弄乱。只要听到赶驼人的哨响，它们就慢慢起身，小心翼翼地站起来继续接下来的路程。遇到有草的地方，它们不会停下脚步，而是边走边吃；哪怕白天没有吃

东西，羊驼在夜里也是从不进食的，因为那是它们进行反刍的时间。羊驼睡觉时，把头倚在胸前，脚屈于腹下。若是驮的东西过于沉重，它会因为无法承载而被压倒，这种时候是无法让它重新站立起来的，它只能待在摔倒的地方。如果继续鞭打逼迫它，它就会以头撞地结束自己的生命。羊驼在遭遇攻击时，既不用蹄也不用牙进行自卫，除了愤怒之外，它们再也不会使用别的武器，但它们会朝羞辱自己的人吐唾沫。据说羊驼在愤怒时分泌的唾液，刺激性很强，沾到人身上甚至会使皮肤长疮疹。

羊驼有约1.2米（4英尺）的身高，如果加上脖子和脑袋的长度，约有1.5米。它们的头部漂亮，眼睛大大的，鼻吻很长，嘴唇厚，上唇裂开向下耷拉着；它们没有门牙和大齿，耳朵长约0.1米，朝前生长，还能移动；尾马细而直，约有0.2米长，略微向上翘起；它们的蹄子是叉开的，与牛蹄一样，这让它们在行走时能保持稳定而不会摔倒。羊驼的背部、臀部和尾巴覆盖着一层短短的绒毛，体侧和腹下的毛却很长。羊驼的毛色不尽相同，有白色的，有黑色的，还有混合色的，其粪便的形状与山羊的粪便类似。

羊驼的饲养方便又经济，由于它们属于偶蹄动物，所以并不需要钉掌；身上满是厚毛，也可以不用配鞍；羊驼食量很小，对于食物也没有过多要求，青草就足以让它们满足，饮水方面也相当节制。

小羊驼顾名思义是指外形与羊驼相似，但体形更小的动物。小羊驼腿比羊驼短，鼻吻也更为紧凑，没有犄角；它们的绒毛是干玫瑰色的，没有羊驼那么深。小羊驼生活在高山顶上，山顶上覆盖的冰雪似乎并不能成为它们的阻碍，反而给它们带来更多乐趣。小羊驼常常结对而行，脚步轻快，非常胆小，容易受惊，看见陌生人就立即跑开。以前在秘鲁，国王曾颁布禁令，不允许猎捕小羊驼，因为它们的数量很少。羊驼的数量到现在也还是不多，而且比西班牙人刚到这里的时候少了很多。小羊驼的肉质不如野羊驼，人们猎捕它们只是为了得到它们的毛皮。在对小羊驼进行猎捕时，猎人会先将它们逼到窄路上，再在那里拉上1米左右高的绳子，然后将衣物和布满满地挂在绳子上，小羊驼被这些随风飘动的衣物惊吓，会恐惧地聚成一团，捕猎者很容易就可以将它们一网打尽。但小羊驼中也有胆子大的，它们会利用自己灵活的身手尝试着从

绳子上跳过去。一旦有小羊驼成功突围，其他小羊驼也会随之效仿，从而躲开猎人。

第十五节 树懒与猴子

树懒

二指树懒和三指树懒可能是自然界中两种相貌最丑陋的动物，它们或许是大自然创造出来的次品，向我们展示了动物存在的瑕疵。

这些树懒天生没有牙齿，因此它们既无法捕捉猎物也不能食肉，甚至连草也不能吃，它们只能以树叶、野果等其他动物不屑吃的东西为生；它们花费许多的时间才能爬到树下，然后花费更多的时间才能爬到树枝上。这种行动会持续很多天，缓慢而乏味，在此期间它们只得忍饥挨饿，或者连最基本的生理需求也要忍着。等到它们爬上树之后，便紧紧地攀在树枝上，不再下来。它们慢慢地吞食树叶，直到把附近树枝上的所有叶子都吃光。接下来的几周，它们都是这样生活，只能吃这种干枯无味的食物，而没有其他食物伴餐。等把树叶吃光后，它们还是只会留在树上，因为下树于它们而言是很困难的事。最后，到了它们再次饥饿难耐而不得不下树时，它们便放手让自己摔下来，重重地落到地面，如同一块没有任何弹性的东西，这是因为它们僵硬懒惰的四肢在这样的自由落体运动中还来不及伸展开来缓解冲力！

它们一旦落到地面，命运就交给了各种敌人。因为它们的肉质不错，所以成为人和肉食动物都会捕杀的对象。它们的数量很少，似乎跟生育能力弱有一定关系，或者说即使有繁殖，存活率也相当低，因此它们的生存岌岌可危，物种濒临灭绝。

猴子

自然界中的所有物种都有自己的特征和无可取代的位置，我们观察到，像犀牛、狮子、象、河马、虎等都有其独自的生存环境。除了这些

大型动物之外，其他动物也都喜欢和自己的同类聚集在一起，形成一个密不可分的群体。博物学家用一个如同网状的图谱为我们介绍了动物的属。这个图谱是按动物的不同特征进行分类的，比如角、牙齿、犄角、鬃毛，甚至是一些更小的特征。其中，有些动物在形体上非常完美，比如与人类十分接近的猴子，它们的许多特征都与人类相同，我们要细致辨别它们和人类的区别。虽然人类是特殊的物种，而且与其他动物有着本质的区别，但因为人类的身高并不出奇，与其他大型动物相比，独立性也更弱一些，所以需要群居生活，而且是很多的人在一起生活。对于猩猩而言，单从它们的外表看，难免会认为它是最后的猴子或原始的人类，因为除了没有灵魂之外，它具有人类所具有的一切。但仅从体形来看，猩猩与人类的差别很小，与猴子则基本毫无区别。

因此，灵魂、思想、语言都是大自然单独赐予人类的，独一无二且与外形无关。尽管猩猩具有类似人类的肢体、四肢、感官、大脑和舌头，却没有语言和思维；虽然猩猩能模仿人类的动作，却无法做出任何人类的行为，这可能是由于缺乏教育，更有可能是因为人类对它们的评价有失公允。也许有人会认为，将丛林中的猴子和城市中的人类放在一起进行比较是不对的，应该将它和同样没有接受过任何教育的野人进行比较。但是，野人是什么样子呢？我们想象中的野人通常是这样的：直直竖立的头发，脸上满是胡子，两条鬓角显得十分粗野，眼窝深陷，像野兽一样怒目圆睁，目光充满野性；厚厚的嘴唇，向前微翘，鼻子是扁平的；身体和四肢都长着很多毛，皮肤粗糙，像是坚硬的牛皮，指甲又长又厚呈勾形，脚底长满了老茧。在性征方面，乳房长且柔软，腹部的皮肉下垂到膝部。孩子们四下乱窜，在污泥中打滚，父母神态狰狞地坐在地上，污垢满身、臭气熏天。这是霍唐托野人的典型肖像，而自然状态下的原始野人更加糟糕。假如人们愿意将猴子和人类进行比较，还需要在这个肖像上添加人体的结构关系、气质的协调、异性之间的吸引等，那么，我们将会发现，野人和猴子尽管不是同一物种，但它们之间的差别并不显著。

确实，单纯从外形上进行判断，猴子可以被认为是人类物种的异化，造物主在创造人类时，既不想把人类的外形塑造成与动物截然不同的样子，但又不想把人类的外形塑造得与猴子一模一样。于是，上帝在

人类的身体内注入了一口仙气，如果上帝将这口仙气也给予了猴子，那么它们将会成为人类强有力的竞争对手。如果再让它们拥有了思维，那么它们就会超越其他物种，不仅能够说话，也能思考。因此，霍唐托野人和猴子之间虽然有着相似的外表，但它们之间还是有着巨大的区别，因为霍唐托野人拥有思维和语言。

谁都不能说一个愚笨的人和一个聪明的人有不同的身体构造，他们之间的区别在于器官的质量，而不是数量，他们一样拥有灵魂。因此，既然人与人是绝对相似的，我们就不能因为两者存有微小差异就毁灭或阻止其思想的形成。同样的道理，动物虽然没有思想，但经过训练后，也可以变得非常聪明。比如大象，它的成长期是动物中最长的，小象在出生后的第一年，都需要得到母象的照顾才能生存，但它是所有动物中最聪明的。豚鼠的成长期很短，三周的时间就可以长大，而且拥有了繁殖后代的能力，但它却是最愚笨的动物之一。再来看猴子，幼猴比人类的婴儿强壮，成长速度也更快，只需要母猴照料几个月就能独立生存，但它所能接受的教育却非常少。

因此，猴子尽管与人类相似，但它仍然只是动物，而不是人类的亚种，即使在动物中也排不到第一位，因为它并不是最聪明的动物。不过，也有人认为猴子与人非常相似，它们不仅能模仿人类的动作，还能模仿人类做各种事情。我们在前面已经讲述过，所有的人类活动都具有社会性，人类的行为首先取决于灵魂，再就是后天的教育，前提条件则是父母必须长期照料孩子。对于猴子而言，这样的照料却是很短暂的，因此它做不了人类所做的任何事情。

模仿能力是猴子最明显的特点，被多数人认为这是它独特的才能。在下结论之前，我们需要首先考察它的模仿是自由行为，还是被迫行为。猴子模仿人类的动作，是不是在它想要模仿时就能做到呢？在这里，我尤其要提到那些不带任何偏见对猴子进行观察的人，我相信他们的看法和我的相同：猴子的模仿是没有任何自觉意识的，尽管它们能像人类一样使用自己的手臂，却不知道人类也有手臂。因为猴子的四肢和器官都与人类非常相似，所以它们必然会与人类的动作相似。但动作的相似性并不意味着模仿活动是有目的性的，就如同我们制造出两个一样的挂钟或两部一样的机器，它们的运动也会相同，但相信没有人会就此

认为它们是在互相模仿。猴子的身体构造与人的身体构造相似，就好比两部同样的机器一定有类似的运动，但是类似并不意味着模仿，前者是由物质组成，后者则以思维存在。模仿的前提条件是意图和目的性，而猴子是没有思维能力的，所以无法产生意图。因此，如果人类想模仿猴子，是一定能够模仿成功的，但猴子永远不会想到要模仿人类。

第三章 飞禽

在飞禽这一章中，布封以他热情而浪漫的笔调，将隐藏在大自然中的飞禽类生物的生存和繁衍展示在我们面前。与法国另一位著名的博物学家法布尔在学术方面的客观冷静不同，布封借助于自己渊博的知识和细腻的文笔，在诙谐幽默的叙述中将勇气超群的鹰、卑微残暴的秃鹫、性情温和的鸽子以及懒惰贪吃的麻雀等生动地向读者一一呈现，不管它们有着怎样的优缺点，他都融入了博大的亲近之情。

第一节 老鹰和秃鹫

老鹰

鹰和狮子在体魄与精神方面有着许多相似之处，它们都有如王者般的翩翩风度和力量，狮子有“百兽之王”的美誉，而鹰则被称为“百禽之首”。鹰的气质高傲，通常情况下不会跟普通的小鸟雀较劲，哪怕被它们冒犯，也往往不屑一顾。但若是遇到贪嘴的乌鸦、嚼舌的喜鹊，又或是聒噪的麻雀，鹰在忍无可忍之时也会杀死它们。鹰更多关注的是它要征服的目标，并享受自己的战利品。鹰在食欲方面很是节制，从来不会一次就将猎物吃掉，而是大方地剩下一部分让其他动物可以食用。鹰在食物的选择上也非常有原则，宁愿饿死也不会食用腐臭的东西；它有着狮子一般的孤傲，专心守护着自己的地盘，维护着在自己领地内猎食的绝对权威。如同我们很少见到两群狮子在同一片树林中一样，两只鹰也几乎不会出现在同一个地方，它们彼此间总是保持着一定的距离，以便拥有足够多的猎物，鹰是根据猎物的多少来决定是否需要扩张自己的地盘。

鹰有一双炯炯有神的眼睛，眼珠的颜色和爪子的形状都与狮子的相似；它的呼吸也很沉重，叫声洪亮。在捕猎本能上，鹰和狮子似乎都是

与生俱来，而且一样的凶猛和高傲，十分难驯化，因此若想驯养它们，必须从它们很小的时候就开始。驯鹰是一项需要有绝佳耐心的技术活，只有掌握高超技巧的人，才可能将雏鹰训练成捕猎高手。同时，随着年龄的增长和力量的增强，猎鹰会对驯养者造成一定的威胁。据史料记载，在东方曾经有人驯养猎鹰以帮助人们捕猎，但现在它已从驯隼场（驯养猎隼的地方，也驯养各种猛兽）慢慢消失了。鹰的体形大，也太重，架在人的肩膀上会令人感到不堪重负；加之鹰的性情暴躁，桀骜不驯，不容易控制，驯养者往往对它的任性或暴躁无法很好地掌控。鹰的爪子和喙都呈弯钩型，强劲有力，这些野性十足的特点都代表着它的天性。鹰不仅拥有这些锐利的武器，其体格也相当强壮，双腿和双翼十分有力；骨骼结实，肌肉紧实，羽毛粗硬，姿态英武，动作敏捷，飞行起来速度极快。

鹰是飞得最高的鸟类，一直被称为天禽，古人认为它是天神的使者，由鹰的飞行而进行占卜。鹰的视力非常好，只是嗅觉略差一些，所以它们追捕猎物时全凭视力。鹰一旦抓住猎物，会低空飞行一段，仿佛在测试猎物的重量，先将猎物扔到地上，然后重新抓起带走。鹰的翅膀虽然苍劲有力，腿却不太灵活，起飞的时候较为困难，特别是负重时，难以在地面上稳稳站立。鹰能够轻松地带走鹅或者鹤这样的大型飞禽，也可以轻易抓走野兔、羊羔或小山羊等动物。它通常会在抓住猎物之后，就地喝血吃肉，然后再将剩余的肉带回自己的地巢中。鹰的巢穴看起来像是平地，而非其他鸟巢那样呈凹陷状，因此被称为“地巢”。

鹰的巢穴通常筑在两块陡峭的岩石之间，那里不仅干燥而且难以接近。鹰巢的构造坚固，经久耐用，一次建造完成就能够居住一生，实在称得上是建筑中的杰作。鹰巢看起来像是一块平地，由许多一两米长的棍棒搭建而成，棍棒首尾相压，缠绕着一些柔软的枝条，里面铺垫着一层灯芯草和欧石楠（编译者注：灌木类植物，叶细长，高15～20厘米，常绿植物，也是挪威的国花）枝等东西。鹰巢有大约几米宽，坚固无比，可以同时承受成年鹰和雏鹰的重量，还能负担大量食物的重量。鹰巢的上方是没有盖子的，朝前延伸突出的岩石就是天然的遮挡物。雌鹰产卵的地点通常会在巢的中央，每次产卵只有两三枚，孵化期大约是一个月，但因为其中常会有未受精的卵，所以同一个巢穴中很少有三只雏

鹰存在，一般就是一两只而已。也有一些人指出，当雏鹰稍稍长大，雌鹰便会杀死其中最弱小或者最贪嘴的那只。如果真有这种情况发生，应该也是因为食物缺乏的缘故——当食物匮乏时，能做的就是减少家庭成员的数量。只要雏鹰稍微强壮足以独自觅食时，父母就会将它们赶出巢，而且不再允许它们回来。

秃鹫

鹰之所以在猛禽中排名第一，不仅因为它比秃鹫强大许多，更因为它的高贵，而不是像秃鹫那样卑劣残暴。鹰的性情高傲，胸襟开阔，勇气超常，动作敏捷，猎食时也不忘展现自己的力量和搏斗精神。秃鹫却正好相反，贪婪怯懦的本性是它唯一的特征，只要动物尸体能够填饱肚子，它就懒得与活物相争。鹰擅长独自搏斗，通常只身追逐、攻击并抓住猎物。而秃鹫只要遇到抵抗，哪怕并不强烈，也是和同类纠集到一起，共同充当杀手。与其说秃鹫是战斗者，不如说是掠夺者，它更多表现出的是愚蠢残忍的屠夫本色。在同类中，只有秃鹫会扑向死尸，将肉撕碎食用，仅余骸骨；它们不仅不会嫌弃尸体的腐化恶臭，甚至趋之若鹜。哪怕是雀鹰等非常小的飞禽，都比秃鹫要勇敢，它们除了独自捕猎，不会食用腐肉。秃鹫的身上集中了老虎的残暴，以及豺的贪婪和卑劣，它们结伴挖掘死尸，吞食腐肉，担当不起“猛禽”的称号。相反，鹰则拥有与狮子相似的力量、高贵大度和豪迈。

秃鹫和鹰的不同性格和外表，让我们很容易将之加以区分。秃鹫的眼睛凸出眼窝，而鹰的眼球则深陷于眼眶中。秃鹫的头部和颈部都是光秃秃的，与其名字相符，只有少量的绒毛或稀落的羽毛，而鹰的这些部位都被羽毛覆盖。我们也可以从爪子的形状来辨别秃鹫和鹰，秃鹫的爪子又短又扁，而鹰的爪子呈半圆形，因为它们几乎不会站在平地上。秃鹫的翅膀上都是绒羽，这是其他食肉猛禽没有的。秃鹫的喉咙下方是一些细毛，而其他猛禽的则是羽毛。除此之外，通过站立的姿势也能看出秃鹫和鹰的不同。鹰总是高傲地站着，身体和足爪呈垂直度；而秃鹫则是低头哈腰半站着，这样的姿态与其卑劣的性情也完全相符。秃鹫是食肉猛禽中唯一结队飞行的，它们的飞行笨拙而沉重，起飞的时候非常困难，有时甚至要试上好几次才能勉强飞起来。正因为这样，我们从很远

的地方就能识别出它们。

第二节 鸢与鵟、伯劳、猫头鹰

鸢与鵟

鸢和鵟是与秃鹫在性情和习惯方面都十分相似的猛禽，相貌丑陋，性情卑劣无耻。尽管秃鹫缺少高贵的品质，但其在体形和力量上都占有优势，所以在猛禽中的排名很靠前。而鸢和鵟并没有这样的优势，只能在数量上弥补甚至超过秃鹫。对人类而言，鸢和鵟很常见——它们经常接近人们居住的地方，因此比秃鹫更令人厌恶。鸢和鵟很少待在沙漠中，几乎不会在荒无人烟的地方筑巢。它们喜欢肥沃的平原，讨厌贫瘠的山地；它们是杂食禽类，但各种肉仍然是它们的最爱，百吃不厌。鸢和鵟之所以喜欢居住在土地肥沃枝繁叶茂的地方，是因为这些地方常常生活着许多昆虫、爬行动物、鸟类、小动物，极易被它们猎食。鸢和鵟天性残暴，狂妄自大又非常愚蠢，它们对于危险的警惕性很差，猎人很轻易就能到达它们身边，猎杀它们要比猎杀秃鹫容易多了。鸢和鵟被猎捕之后极难驯化成功，所以，这也决定了它们无法进入鸟类“贵族”的行列。

尽管鸢和鵟的本性相似，体形、嘴巴等多个方面也都很近似，但要区分它们还是很容易的，甚至它们与其他肉食猛禽的差别也不难看出。尾部凹形是鸢的一个明显特征，尾羽的中间部分很短，从远处看过去像一个叉，所以又被称为“叉尾鹰”。鸢的翅膀比鵟长，飞翔的时候也就更轻松。鸢大部分时间都待在空中，每天的飞行距离可以很远，几乎从来不休息。但鸢不是为了猎捕猎物也不是为了寻找猎物而飞翔，因为它并不吃飞禽，它只是天生喜欢在空中飞翔。鸢的飞翔姿势优美，在空中翱翔时，一双狭长的翅膀好像伸展着不动，而尾部则起着平衡的作用，让它顺利地向前飞行。鸢似乎从来不会疲惫，起飞时轻轻松松，下降时慢慢滑落，不仅可以瞬间起飞，还可以随时减速，甚至悬停在空中静静地待上好几个小时，几乎无法看出它翅膀的扇动。

伯劳

伯劳尽管体形非常小，却勇猛异常。伯劳身体的各个部分小巧玲珑，弯钩状的嘴强壮有力。将伯劳划到食肉猛禽中，是因为它酷爱肉食，而且是非常残忍，嗜血成性的猛禽。一只毫不起眼的伯劳居然能够与喜鹊、乌鸦等比它体形大得多的鸟类进行勇敢的争斗，而且它并非为了自卫而反击，常常是主动发起攻击。特别是一对想要保护自己孩子的伯劳夫妻，它们总是能够在与对手的搏斗中获胜。如果有敌人闯入领地，它们会快速地向前冲去，一边发出叫声，一边奋力攻击对手，怒气冲天地赶走敌人，让对手不敢再来冒犯。哪怕是与实力悬殊的强敌进行斗争，伯劳也从来不会屈服，而且很少被敌人虏走，它们会牢牢地抓住强敌，绝不松爪，最终与敌人同归于尽。因此，即使是以凶猛著称的鹰都不敢轻易招惹伯劳，总是远远地避开它们。

伯劳的体形只有百灵鸟那么大，但它不会因此而自卑，常常成双成对地在空中翱翔，尽管周围有鹰、雀等空中霸王，它们却从来不会害怕。伯劳以昆虫为主要食物，但它们最喜欢的还是肉类。在自己的地盘上寻找食物时，它们从来不必担心遭遇危险，见到小鸟就常常追逐；小山鹌或者小野兔也是它们喜欢抓捕的动物；一些被陷阱困住的斑鸠、乌鸦、小鸟也会成为它们的美餐。它们往往是先用爪子抓紧猎物，然后用喙将猎物的脑袋和颈部戳破，等到猎物断气，再拔掉猎物的毛，美美地吃上一顿，最后将剩余部分带回巢中。

猫头鹰

诗人在他们的诗句中将鹰誉为天王，而将猫头鹰称为天后。猫头鹰和普通的鹰非常相似，都拥有强壮的身体，体形大小也类似，只是猫头鹰要比鹰小一点，而且身体各个部分的比例与鹰也有一定的差别。猫头鹰的腿部、身子、尾巴都比鹰要小一号，但头部却比较大，一双翅膀伸展开来大约有1.5米，窄于鹰的双翼。此外，猫头鹰的显著特征是它的大头颅，同时脸庞宽阔，耳洞又大又深。猫头鹰的这些特征让我们很容易就能认出它来，它的头上有一对长长的耳朵，羽毛竖起来大约有两英寸长；黑黑的嘴巴呈弯钩状，有一双又大又亮的眼睛，瞳孔是黑色的，眼睛周围又是橘黄色的；脸部的轮廓由放射状的羽毛组成，面部都是浅色

的绒毛或者白色的短毛，四周则是卷曲的短羽；黑色的爪子弯曲着，强劲有力；颈部很短；身上被褐色的羽毛覆盖，背部分布着黑点和黄斑，黄色的腹部上散布着一些黑点，而且还有褐色的条纹；爪子的上部一直到趾甲都被一层厚厚的橙红色羽毛覆盖着。猫头鹰在夜里的叫声非常恐怖，在空旷的田野上回荡，周围鸟穴中的鸟都会被惊醒。

猫头鹰通常住在岩洞中或者塔楼内。它的食物主要是小野兔、家兔和鼠类，一旦捕捉到这些小动物，它会先生吞下肚，等到消化了肉之后，再将毛皮和骨头吐出来。猫头鹰的食物种样繁多，除了上面提到的小动物之外，蝙蝠、蛇，蜥蜴、蛤蟆等动物也是它猎捕的目标，并且会将这些用于喂养后代。猫头鹰总是在巢穴中堆满食物，它是善于储存食物的猛禽。

第三节 鸽子、麻雀

鸽子

飞禽中容易驯化的都是如鸡、火鸡、孔雀等身体比较笨重的，而身体较为轻盈、飞行速度快的鸟类，则不容易驯养。人们要圈养家禽，只需要在一块地上搭建一个茅舍；但如果想要圈养鸽子，并且要留住它们，就没那么简单了，必须建起一个阁楼，用泥将阁楼的外墙抹得光滑平整，再在里面搭上一些小格子。

鸽子并不像牛、羊、马等家畜那样容易驯养，也不像鸡、鸭、鹅等家禽那般愿意被圈禁在一处，它们只会在自愿被“俘虏”时，人们才得以豢养它。鸽子之所以接近人类，是因为人类为其提供了丰富的食物、舒适的住所。当人们不能为鸽子提供它们所需的一切时，它们便会毫无留恋地飞到其他地方去。甚至有不喜欢待在人类所提供的舒适住所中，而宁愿住在土洞中或者树洞中的鸽子，不管人们做得多么好，始终没办法让它们留在阁楼中；当然，也有一些鸽子正好相反，不敢离开阁楼，寸步不离地待在里面，连食物也需要人们放进阁楼里。

鸽子在历史上充当了众多的角色，宠物、信使甚至是人们的食物。鸽子的归巢本领非常高超，哪怕被人们带到很远的地方，鸽子也都会回到自己的巢中，鸽子的这种能力被人们充分利用，逐渐驯养出了信鸽。

家鸽和野鸽的共同特征都是喜欢群居生活，对同伴满怀依恋，脾气温顺，忠诚友爱，整洁自理。鸽子伴侣间的热情似乎从来不会消退，它们彼此扶持，举止轻柔，不抱怨，不发火，也不争吵，一起承担所有的事情。雄鸽会和雌鸽轮流孵卵，并协助养育幼鸽，以此分担妻子的辛苦，鸽子夫妇做到了真正的“男女平等”，这也是维持它们幸福生活的基础，在这方面人类应该向它们学习。

麻雀

麻雀从不会选择在荒僻的地方和人烟稀少的地区筑巢，它们和老鼠一样，总是待在人们的住宅附近；它们也不喜欢生活在树林或者旷野，人们会发现城市里的麻雀要比乡村中的多。麻雀喜欢人多的地方，是因为它们既懒惰又贪食，只想着吃现成，寄希望于施舍。粮仓、谷仓、鸡舍、阁楼等地是麻雀最喜欢待的地方，这里有它们喜欢吃的食物。由于数量众多，而且非常贪婪，所以它们总是做出一些愚蠢的事情。麻雀对于人类而言，没有任何作用。它的羽毛粗糙，毫无价值；肉也不是什么美味佳肴；它们的叫声刺耳，行为无所节制，因此人们总是在驱赶它们，想尽办法，使用各种手段将它们赶走。

麻雀之所以一直让人讨厌，不仅因为它们的繁殖力强，数量众多，更因为它们诡计多端，绝不愿意离开舒适之地。麻雀多疑而狡猾，并不惧怕人，它们轻易就能躲开人们设置的圈套，很少上当，而且十分讨厌想要猎捕它们的人。

麻雀在筑巢方面不太讲究，外面用干草简单搭建，里面则填充着一些羽毛。如果有人捣毁了它们的窝，它们马上就能搭建一个新的。通常情况下，麻雀的窝里总是有五六枚蛋卵，甚至更多，一旦遭到破坏，8至10天的时间就又能再产一窝。当麻雀把窝搭建在树上或者屋顶上时，如果它们的蛋遭到破坏，便会寻找更加隐蔽的地方产卵，比如仓库这样的地方。麻雀对粮食的消耗量惊人，据饲养过麻雀的人统计，一对成年

麻雀每年吃掉的谷物大约是10公斤。麻雀有的时候虽然也会吃昆虫，并且用昆虫喂养雏鸟，但它们的主要食物还是人类的粮食——谷物。麻雀总是在农民播种或者收割谷物时，甚至是农妇在给家禽喂食谷物时，紧紧地跟在后面，伺机觅食。麻雀还常常飞到鸽楼中寻找食物，甚至吃掉幼鸽嗉囊中的东西。它们还喜欢吃蜂蜜，严重威胁到那些有益于人类的昆虫。正是它们这些不端的行为，才让人们厌恶不已，想尽各种方法消灭它们。

麻雀通常生活在屋檐下或者墙洞中，因此会在瓦下、檐沟、枯井中或者窗台上筑巢，也有些麻雀会在树上搭窝，有人曾在大核桃树和柳树上发现过麻雀窝。当麻雀在树上搭窝时，常选在树顶上，外面用干草，内部填充羽毛，跟平常的窝一样。不过，有的麻雀窝会比较特殊，为了防止雨水流到窝内，会在窝的上面搭建一个棚盖；当筑巢的地方是选在洞内或者有遮盖物的地方时，就不会搭建这样的棚盖，通过这一点，也可以看出麻雀有着一定的理智。当然，有些麻雀不仅非常懒惰，还特别蛮横，自己不愿意耗力筑巢，而是觊觎别人的家。它们赶走白尾燕，将燕子窝占为己有；甚至会袭击鸽子，将其赶出鸽棚，自己住下。我们所见到的麻雀之所以比其他鸟类更多变和更完善，是因为它们的群居生活习性；它们从社会中索取自己所需的一切东西，却不为社会做一点贡献，因此它们获得了一种本能——谨慎，这种谨慎随着时间、场所、习惯的不同，有着不同的表现形式。

第四节 金丝雀、莺、红喉雀

金丝雀

如果我们把夜莺喻为树林歌手，那么金丝雀就称得上是室内音乐家。夜莺拥有大自然赐予的天赋，而金丝雀主要是后天受到了艺术的熏陶。尽管金丝雀的歌喉不是很响亮，音域很窄，不能传到很远的地方，音色的变化也较单一，但它的听觉系统非常灵敏，擅长模仿，记忆力很强。因为不同性格的动物在感官的发育上存在相应的差异，金丝雀会很专注地倾听，也就更容易接受陌生事物，使它变得性情温和，所以对群

居生活越来越适应。金丝雀的天性也让它们与人类相处起来更加容易，并且表现出依恋和喜欢。它们总是把自己的热情呈现出来，偶尔也发些小脾气，但没有任何恶意；即使是在发怒时，它们也不会做出伤害人类的行为。与其他家养鸟一样，金丝雀的主要食物也是谷子，它们不挑食，不像夜莺那样一定要吃肉或者昆虫，甚至还需要加工好后才行。驯养金丝雀是件很容易的事，并且非常有趣，它的专注让它学东西非常快，花不了多少时间就能适应人类的歌声和乐器声。它很配合人类对它的教育，带给人们的收获远远超过了我们在它身上的付出。夜莺常常恃才傲物，总是试图保护自己拥有的一切，人类对它的调教基本不起作用。夜莺的鸣唱是自发的，歌喉也花样百出，这是大自然的恩赐，人类的后天艺术无法对此做出任何改变。而金丝雀的歌喉轻柔，很容易被改变，它的歌唱从不停歇，它的歌声陪我们度过漫长的岁月，让人精神振奋，备感幸福。它令青年人快乐，令隐居的人喜悦，更以欢快的情绪感染受束缚的人。我们可以和金丝雀近距离相处，它的歌声能唤起我们内心的感动。如果说秃鹫是作恶多端的代表，金丝雀就是行善无穷的使者。

莺

冬天是阴霾而僵死的季节，或者确切地说，是自然界的休眠期和沉睡期，昆虫静止不动，爬行动物停止了活动，植物也失去了绿色，水中的生物被冰封，兽类被困在岩洞、山洞和地洞中，展现的是一幅荒无人烟的景象。不过，鸟儿在初春时分的出现为大地带来了复苏的信号，这些在林中活跃的小生命用歌声唤醒了沉睡的大自然，树木抽出嫩芽，小树林换上新装，这一切都显示出生命的活力。

在这些森林的精灵中，莺是数量最多、最可爱的鸟，活跃、轻盈、敏捷是它们主要的特征。莺的一举一动都那么富有感情；所有的鸣叫声都流露出快乐的旋律，所有的行为都在诉说着心中的爱意。每当树木开始发芽，花苞开始绽放，这些漂亮的鸟儿就在我们身边出现，花园中、林荫路或者丛林中，还有一些在芦苇荡中，四处鸟语盈盈。大自然中的各个角落都能看到它们的身影，旷野中回荡着它们嘹亮的歌声，欢快的身影在花丛中飞来飞去。

尽管它们汇聚了以上所有的优点，我依然想把“美丽”这个词所代表的优点加入到它们天生的优雅气质中。不过，有得必有失，大自然似乎只注重了塑造它们可爱的性情，却忘了对它们的羽毛做美化。莺的羽毛暗淡无光，只有两三种莺的身上有一些起到装饰效果的斑点，其他的则全身都是暗淡的灰白色或者褐色。

莺通常生活在花园里、树丛中或者种植蚕豆的菜地里，栖息在豆藤的支架上；它们在这些地方筑巢玩耍，不停地进进出出，一直等到收获季节来临。那时也就接近它们的迁徙期了，于是依依不舍与这片土地告别。

观看莺相互间的追逐、嬉戏，如同观赏一出打闹剧，只是它们的打闹很有节制，并不是争斗，多数都是玩笑性的，而且常常以一曲婉转的歌唱结束战斗。如果斑鸠是忠实爱情的象征，那么莺则代表着多情。不过，莺的快乐、活泼和开朗，并非表示它对爱情缺乏热心和忠贞，从雌鸟孵卵时雄鸟总是小心翼翼地呵护这一点就能看出，它们一起照顾刚刚出生的小鸟，即使小莺长大，一家人也不会分开。

莺天性胆怯，哪怕是跟自己一样弱小的鸟类，它也避得远远的，更害怕遇见自己的天敌——伯劳。不过，它们的记性似乎很差，危险一旦过去，它们就会将一切惊吓抛到脑后，变得无比快乐，放声高歌。它喜欢将自己隐藏在茂密的树枝间唱歌，偶尔露一下头马上又缩回到树丛深处去。清晨，它们会采饮露珠；炎热的夏季，下过雨之后，它们会站在湿漉漉的树叶上，摇晃树枝上的雨水，让自己洗一个淋浴。

黑头莺是莺类中歌声最动听、最持久的，与夜莺类似。我们能够在很长一段时间内听到它的歌声，当其他鸟儿销声匿迹好几周后，它的歌声依然会持续在树林中回响。黑头莺的嗓音纯洁，虽然音域不是很广，但美妙动听，如同一连串变化的音调，婉转而富有层次；它的歌声似乎带着森林的清新和安静，传达着幸福的感觉，这样的歌声很容易引起人们的共鸣。

红喉雀

阴暗潮湿的地方是红喉雀喜欢选择的居住地，它在春季的主要食物

是蚯蚓和小昆虫，它有时候会在空中飞来飞去，始终绕着一片树叶旋转，只是为了追捕苍蝇；有时候它会在地面上扇动着翅膀快速冲向自己的猎物。到了秋天，可供选择的食物就多起来，荆棘中的果实、葡萄园中的葡萄、树林里的浆果……但这些也让它们常常陷入人们设计的陷阱中。因为猎人深谙红喉雀的习性，往往将一些野果作为诱饵放在陷阱旁边。红喉雀喜欢待在水边，既为了饮水，也为了沐浴，尤其是秋天，它因为多食而比较肥胖，所以需要饮用更多的水。

红喉雀也是森林中起得最早的鸟，每天清早，其他鸟儿都是在红喉雀的高歌中醒过来。不仅如此，它还很晚才休息，半夜也能听见它的歌声、看见它飞翔的身影；人们总是趁着夜色去捕捉它。红喉雀生性单纯，活泼好动，好奇心又强，还特别容易上当受骗，所以经常落入人们设计的陷阱中，可以说是最容易被抓住的鸟儿。只要捕鸟的人发出类似于鸟的叫声，或者摇晃枝条，便能吸引到它，然后用套网或者粘鸟板将它抓住。猫头鹰的叫声或用诱鸟笛模仿出来的猫头鹰的叫声，都会惊吓到它，甚至只是用口哨模仿它的叫声或其他鸟的声音，也都能惊动它。它们飞翔时会发出叫声，在很远的地方就能听见，那不是悠扬快乐的歌声，而是习惯性的鸣叫，或是表达找到新东西的激动而发出的叫声。它们在布下的陷阱周围试探，直到落入陷阱中无法动弹。猎鸟的人会在树林中的小路上设置圈套，而且因为红喉雀的飞翔高度与地面只有一两米的距离，所以圈套放的位置比较低。红喉雀虽然容易上当，但如果有一只逃脱了圈套，它就会向同伴发出警告，其他靠近圈套的鸟会立刻逃之夭夭。人们在树林边布置粘鸟板或者圈套也能抓住红喉雀，不过最可靠的捕鸟工具是捕鸟夹子和套鸟圈，如果再加上诱饵，然后在林间空地或者小路上铺网，这些鸟受好奇心的驱使总是会乖乖地钻进去。

第五节 南美鹤

南美鹤是居住在南美地区热带森林中的一种群居鸟类，从不靠近已被人类开发的地区，更不会涉足人类的居住地。它们喜欢在山区或地势较高的地区成群地活动，很少待在沼泽地或水边。南美鹤在飞翔方面的能力远不及行走奔跑的能力，它们的飞翔高度只有几米，只会偶尔飞到

离地面不高的地方或低矮的树枝上休息，飞翔的姿态也显得十分笨拙，远没有奔跑时那样灵动轻盈。它们和凤冠雉一类的鸡形目飞禽一样，多以野果为食。野生南美鹤惧怕人类，一旦遇到人，便发出火鸡一般的尖叫飞快地逃走。

南美鹤筑窝搭巢的方式很特别，它们从不捡拾树枝、草棍，而是在大树的底部挖坑搭巢，并把蛋卵产在那里。它们产蛋的数量比较多，通常有10至16枚。与其他鸟类一样，南美鹤的产蛋数量也是会随着雌鸟年龄的增长而出现变化。它们的蛋呈差不多圆球状，比鸡蛋要大些，淡绿的颜色。刚出生的南美鹤幼鸟身上长着一层细细的绒毛，这层绒毛比小鸡或小山鹑的绒毛保留的时间要长，约5厘米（2英寸），浓密而柔软。由于南美鹤全身长满绒毛，有时会被人们与长有鬃毛的走兽混淆。

虽然南美鹤不会自愿涉足人类的居住区，但却极易饲养，对于照顾它的人，它们表现出像狗一样的殷勤和忠诚。如果家中饲养了南美鹤，它会和主人保持贴身接触，主动而殷勤地跟随着主人，在主人身旁跑来跑去，以此向主人表达它的乐于见到和伴随。倘若南美鹤对某样东西产生不好的感觉时，它就会用嘴啄对方并将之赶走，有时甚至会将对方追出很远的地方。事实上，它发动袭击并非因为它受到了攻击或是不友善的对待，而是因为它就这么任性，对方难看的长相或难闻的气味都会成为它发起攻击的理由。南美鹤的服从性非常强，对主人的命令言听计从，只要主人发话，它就可以照做无误。南美鹤渴望被抚摸，尤其喜欢人们挠它的头和颈部，一旦它习惯了这种亲昵的爱抚，就会变得相当缠人，总会主动要求人们的一再抚摸。它有时会不等主人的呼唤，在人们用餐时就自行跑到饭厅里，把自己当成主人，先是把饭厅里的猫或狗赶开，再向人们讨要食物。它信心满满又胆大妄为，毫无惧怕，连体形与它相当的狗在它面前也不得不退避三舍。

南美鹤一旦与狗搏斗起来，持续的时间通常会很长。战斗中的南美鹤会凭借空中优势，躲过狗的尖牙利齿，然后扑到狗的身上，用嘴或爪想方设法将狗的眼睛弄瞎。只要稍占上风，它就会全力去追赶狗，若是这时没有人制止它，它会将狗置于死地才罢休。在与人的相处中，南美鹤几乎具备了与狗完全相同的本能，有人因此笑称可以驯养它去牧羊。南美鹤是嫉妒心很强的飞禽，如果碰到谁试图与它分享主人的爱抚，它

就会记恨，比如每当它跑到桌前，只要看到黑人或仆人光着腿挨着主人，它就会死命地去啄他们的腿。

第六节 鹡鸰与鷦鷯

鹡鸰

鹡鸰的体形并不大，和普通的山雀差不了太多，但因为它长着一条长长的尾巴，看起来会让人觉得很大。鹡鸰的总身长约为17厘米（7英寸），尾巴就占去约8.9厘米（3.5英寸）。它的长尾巴在飞行时展开，像船桨一样，正是这个又长又宽的“桨”，使它在飞行中可以控制平衡、转身、前冲和折回，但降落时要麻烦些，需要连续上下摆动五六次，才能控制平衡。

河滩上是它们撒欢的最佳地点，轻盈自由地奔跑，偶尔亮出长腿站在水中。经常会有这样一幅场景出现在人们眼前：在水磨坊的闸门边上徘徊的鹡鸰，时而在闸门边的石头上停驻，时而在洗衣妇的身边围绕。它们并不害怕这些洗衣的妇人，因为她们会时常扔出一些面包屑供鹡鸰捡食。撒欢的鹡鸰不停地拍打尾巴，似乎在模仿妇女们洗衣的动作，这种习惯性的动作使它们获得了“洗衣鸟”的别称。

还有一种鹡鸰似乎对家畜群很有兴趣，习惯在草原上尾随牛羊，在它们中间飞来飞去，大摇大摆地在其间散步，有时还胆大到停在牛或羊的背上；它们也能和牧人无拘无束地共处，飞前飞后，从不担心有危险；它们甚至会在狼或猛禽靠近时，充当预警者。因此，这些共同营建惬意田园生活的小生灵又有“牧羊鸟”的美称。鹡鸰天性淳朴、平和友好，是人类的朋友。除非人类对它们进行野蛮的驱赶或者是它们感受到生命受到了威胁，否则它们绝不会远离人类。鹡鸰的依恋情结十分浓厚，它们对人类的亲密是自然界中任何鸟类都无法企及的。它们基本不会避开人类，即使稍稍离开也不会飞太远；它们十分信任人类，哪怕是面对一些拿着武器靠近它们的猎人，它们也不会胆怯，即便飞走，但一会儿又会马上飞回来，似乎根本不知道逃跑为何意。

尽管鹡鸰将人类视为朋友，但它却不会屈服于人类，更拒绝成为人类的奴隶，一旦把它们抓到笼子里关起来，很快就会死去。它们性情自由，喜欢生活在美丽的大自然中，抗拒鸟笼这种空间狭小的“监狱”。但如果是冬天，它们也能接受人们把它们放到有面包屑的房间里。有时候它们也会飞到在水面上行驶的轮船上，钻进船舱，与船员们混熟，然后在整个旅途中跟随着船员，直到轮船停泊船员上岸时才分手。

鹪鹩

天寒地冻的冬季，在农村和城镇附近，我们时常可以看到一种个头小巧的鸟儿。那就是鹪鹩。傍晚时分，鹪鹩在回巢前，总会再逗留一会儿，要么站在树木的高处，要么跳到柴堆顶上，用它嘹亮的歌喉发出愉悦的鸣叫；有时，它也会在屋顶停留片刻，之后再钻到屋檐下或者墙洞里，当它从里面出来，又会翘着小尾巴蹦蹦跳跳地跑到树枝堆上。它的飞行距离比较短，而且总是绕着圈飞，但翅膀扇动的频率却很快，快到我们难以看清它的动作，只能听到空气振动的声音。希腊人因此称它为“嗡嗡响的陀螺”，非常恰当地体现了它的飞行姿态，也形象地描绘了它短小紧凑的身形。

鹪鹩是我们这里（编译者注：意指作者所在的法国）唯一能在冬天生活的鸟儿，在这寒冷而萧条的季节里，万物寂寥，只有它依然保持着愉快欢乐的情绪。它总是那么活跃，正如贝隆所说，我们无法用人类的语言形容鹪鹩的快乐。它的叫声既高昂又清晰响亮，由一些短促的音符组成——唏嘀哩啼、唏嘀哩啼，它大约五六秒钟重复一次这些音符。在空旷的冬天的原野上，乌鸦偶尔会发出难听的叫声，而鹪鹩的鸣唱则是我们所能听到的最为轻快优雅的声音。尤其雪花飘飞的时候，又或寒冷难耐的夜晚，它们的叫声就更为明显。鹪鹩生活在农家鸡舍或柴火堆里，它们以树枝中、树皮上、屋顶下、墙洞里，甚至枯井中的昆虫蛹或尸体为食。它们也经常飞到温泉旁边或是没有结冰的小河边饮水。它们成群结队地钻进空心的柳树里觅食，然后又很快飞回巢中。它们的戒备之心很弱，也毫不拘谨，要靠近它们很容易，但要想抓住它们却很难，因为它们轻巧灵活，总能逃出生天。

春天，鹪鹩回到树林中生活，它们把巢筑在靠近地面的茂密树枝

上，也会选择在草地筑窝；有时还会在倒地的树干下，岩石边、小溪边上突出的地方，野外孤零零的茅草屋顶下，甚至伐木工的小屋顶上建造住宅。鹪鹩巢穴的外壳很特别，是由苔藓充当，它搭窝前需要收集许多的苔藓，再在里面铺上柔软的羽毛。它们的窝又圆又大，外表却完全不起眼，如一团扔在一边的苔藓，因此总是被敌人忽略。鹪鹩的巢穴只有一个非常小的出入口，巢穴中通常有9至10个蛋，蛋的个头小小的，颜色灰白中带一片红色的斑点。它们如果察觉自己的蛋卵被发现，会毫不犹豫地弃蛋离开。

第七节 蜂鸟、翠鸟与鹦鹉

蜂鸟

蜂鸟是所有飞禽中体态最优雅，羽毛色彩最耀眼的，这是大自然的杰作，如同天然铸造的装饰物，哪怕金雕和玉琢的精品也无法与之媲美。蜂鸟虽然是鸟类，但体形非常小，正所谓“最完美的东西往往汇集在最微小的东西中”，蜂鸟就是大自然制造的精品，它汇集了大自然赋予鸟儿的所有优势：轻盈灵活、动作敏捷、姿态优雅、羽毛华丽，它身上闪烁着绿翡翠、红宝石和黄玉般的光泽，从来不会让羽毛沾染尘埃，终日飞翔在空中，偶尔从草地上掠过，在花丛之间穿梭，永远自由自在地生活在天地间。它有着花朵的明艳与光泽，鲜美的花露是它的食粮。它只在鲜花盛开的国度栖身。

蜂鸟在美洲大陆最炎热的地区生活，它们种类繁多，但仅仅存在于南北回归线之间，那些在夏天把活动范围扩展到温暖地区的蜂鸟，也只是能够短暂停留而已。它们仿佛在追逐太阳，随着太阳一起从东方升起，在西方落下，乘着风的翅膀伴着春天一起翱翔。

这些小鸟绚丽多彩，有着火焰般的色彩，印第安人惊讶之余称它们为“太阳之光”；因为它们身材极小，体重只相当于二十几粒米的重量（一粒米约为0.05克），西班牙人因此称它们为“米粒鸟”。尼伦堡曾说，蜂鸟和它的窝加在一起，重量也不到两克。因此在体形上，蜂鸟比

牛虻和胡蜂还小。它的嘴巴像是一根细针，舌头则如一根纤细的线，眼睛如同两个闪闪发光的小黑点；它翅膀上的羽毛非常细，看上去像是透明的；双足又短又小，很容易被忽略；除了在夜晚停下来休息外，它很少使用自己的双足；它们白天总是在空中纵情遨游，一旦飞起来就会持续很长时间，而且速度很快，并发出“嗡嗡”的响声。它的双翅振动的频率非常快，所以当它在空中停留时看起来仿佛是静止的。人们看到它在一朵花前动也不动地停留片刻，然后又箭一般朝另一朵花飞去。它最喜欢在花丛间穿梭，和所有花朵交朋友，它将细长的舌头探进花蕊中，用双翅抚摸花朵，但它不会固定停留在一个地方，也不会飞走就不回来。这样的来去无常仅仅是因为它的随心所欲和恣意欢愉的行动方式。这位花的情人虽然靠花生存，却并不摧残花朵，更不会加速花朵的凋谢；它只是去吮吸花蜜，这似乎是它舌头的唯一用途。蜂鸟的舌头类似于一对有凹槽的东西，合在一起形成一个管，顶端分叉并在一起，犹如一个吸管，而作用也与吸管一样。当它想要吸食花蜜时，将舌头伸到花蕊的深处，就可以吮吸甜美的花蜜。

蜂鸟体形虽小，胆子却很大，勇气超群，而且充满活力；人们有时会看见它愤怒地追逐体积比自己大很多倍的鸟儿，伏在它们身上，反反复复地啄它们，让它们载着自己飞翔，一直到怒火平息为止。蜂鸟之间有时也会发生非常激烈的搏斗，急躁或许是它们天生的特点。当它飞入一朵花，发现花儿已经凋零，无蜜可吮吸时，便会恼怒不已，立刻毁掉花瓣。蜂鸟发出的是一种低微急促而反复的“嘶卡勒不……嘶卡勒不……”声。一大早就能听见它们在林中的鸣叫声，待到太阳光芒四射时，它们便向着辽阔的原野飞去。

蜂鸟通常情况下是形单影只，而非成群结队的，但它们在筑巢时，却是成双成对地出入。它们的巢穴如同其纤细的身形一样精致，筑巢用的是花上的细绒或小毛絮，它们把巢穴编织得很精细，里面一层壁又软又厚，十分结实。筑巢时，雌蜂鸟负责的工作是建造，雄蜂鸟则负责运输——衔来材料。它们筑巢时非常用心和认真，精心寻找和挑选那些适合编织的纤维，为未来的儿女精心制成温柔的摇篮。它们利用脖颈和尾巴将巢边抹得光光滑滑，还把巢的外面用许多小块的胶质树皮蒙上，并密密地粘起来，这样筑起的巢穴既坚固又能抵御风雨的侵蚀。蜂鸟常把

巢筑在橘子树、柠檬树的两片叶子间或某根小树枝上面，有时也会选择在茅屋边下垂的干草上筑巢。蜂鸟的窝巢还没有半个杏子大，呈半圆形，里面有两只白色的、如豌豆般大小的蛋，雄鸟会和雌鸟轮流孵蛋，13天后小蜂鸟就孵出来了，个头跟苍蝇差不多。迪泰特尔神父说：“我一直不知道蜂鸟用什么东西来喂幼鸟，只是看到它让幼鸟舔食自己沾满花蜜的舌头。”

要想饲养蜂鸟，会是件极为困难的事，甚至无法达成。曾有人尝试用果汁来喂食蜂鸟，可是几个星期后蜂鸟就死了，果汁虽然清淡，但毕竟与蜂鸟从花朵里采来的蜂蜜差别很大，倒不如试试改用蜂蜜，或者它们有机会活下来。

猎鸟者一般用沙子或用吹管吹射小石子击打的方式来捕捉蜂鸟，蜂鸟没有太高的警戒心，对于人类的靠近不敏感，走到离它大约只有五六步了，它也毫无察觉。还有一个办法可以很好地捕捉到蜂鸟：拿一根尖头涂着胶的细木棍，在花丛中守候，当蜂鸟在花朵前停留时，就可轻易地将它粘在木棍上。蜂鸟被捕捉后很快就会死掉，成为栖息地的印第安女人的首饰，如耳环。秘鲁还有人用蜂鸟毛做羽毛画：他们用蜂鸟的羽毛组成图画，他们的史料记载中曾夸赞这种图画的精美。也有人曾经见过这类作品，惊叹于其画面的艳丽和精致。

蜂鸟种类繁多，大自然给予了它们充分的照顾和信赖，比如蜂鸟的近亲蜂雀。蜂雀同样生活在美洲大陆的炎热地区，被大自然以同样的模子造就出来。它们和蜂鸟一样光彩夺目、小巧轻盈、以花为生，全身羽毛柔美且充满光泽。在特性以及筑巢和生活方式等方面，蜂雀和蜂鸟并无差别，美丽、活跃、经常采花，性格可爱。因为这种种相似，常常让我们难以区分，将它们混淆为同一种鸟。事实上，它们还是存在着明显差别的，尤其是喙部，蜂雀的喙平而细长，喙尖稍稍凸起，整个喙都是弯曲的，不像蜂鸟那样直。另外，蜂雀的身子虽然也是柔软轻盈的，但比蜂鸟的要长一些。一般来说它们的身形大小相同，只是有些小型蜂雀会比蜂鸟还小得多。

翠鸟

笔者所在的气候区域内，最美丽的鸟类之一要数翠鸟。就其色彩的清晰、丰富、夺目而言，在欧洲是其他任何一种鸟儿都无法比拟的：有着彩虹般的渐变，珐琅一样的亮彩，丝绸似的光泽。翠鸟后背中部和尾巴上端是一种鲜艳明亮的蓝色，在阳光的照射下，闪烁着宝石般的光彩和绿松石般的艳丽。它们的翅膀绿蓝相间，大部分羽毛都带有一种海蓝色的斑点，头和颈项上部的羽毛则是蔚蓝色的，点缀着一些浅蓝色的斑点，胸前红色的羽毛泛着微微的黄色，如同烧得通红的一团炭。

在阳光的照耀下，翠鸟为万物印上了丰富的色彩。它们美丽的外表似乎就得益于这些阳光的恩赐。尽管我们不能确定这里的翠鸟是否原产于东南方，但从整体而言，它们的原属地应该就是东方和南方，因为欧洲只有一种翠鸟，非洲和亚洲却可以为我们提供二十多种，而美洲炎热的气候区至少还有八种。

虽然翠鸟一开始在更炎热的气候区生活，但现在仿佛已习惯于低温，甚至可以适应欧洲寒冷的气候。即使在冬季，也能看到它们的踪迹。它们沿着小溪行走，看到鱼的影踪就用喙撬开冰面，钻到水下捕捉，然后带着战利品上岸。德国人因此称它为“冰鸟”。博物学家贝隆也曾误认为翠鸟是候鸟，以为法国只是它们过冬的经停区，但实际上，霜降的时候这些翠鸟也住在这里。

翠鸟的飞行速度很快，常常是沿着曲折的小溪而行，它们掠过水面，一边飞，一边发出尖锐的“叽叽叽”的叫声。翠鸟在春季的鸣叫则是另一种音调。它们站在水边，哪怕水流声和瀑布声很大，它们的歌声也能传到我们的耳朵里。翠鸟天生好动，但为了捕食，它经常从远处飞到伸出水面的树枝上，盯着水面，一动不动地等待小鱼游过来，耐性极好，有时可以等上两个小时。一旦发现有鱼经过，它便会立刻钻入水中，几秒钟后便带着猎物回到岸上，尽情享用。

若是水面上没有伸出来的树枝，翠鸟也会选择守候在靠近岸边的石头上或是沙砾上，只要觉察到有小鱼，便瞬间跃起，再垂直冲向水中。我们也常常看到翠鸟在快速飞行时突然停住，在同一地方一动不动地停留几秒钟，这一现象在冬天最为常见。当河水汹涌或水面结冰时，翠鸟就不得不离开小河，找地方休息。每当歇息时，它会待在15至6米（20

英尺）的高空；当它想换地方时，便降低高度，待在离水面不到一尺的地方，然后重新飞到高处休息。这种反复进行的动作表明：它不断下到低处去捕捉水面上的小鱼或昆虫，但通常一无所获，然而为了觅食，它还是常常以这种方式飞很远的路。

翠鸟在小河与小溪旁栖身，但并不自己筑巢，它主要利用水鼠或蟹虾挖的洞，再将其挖深、修补，把入口处修理得更狭窄。虽然从巢穴中有小鱼刺和沾着泥土的鳞片等这些情况看，不像是翠鸟的巢，但我们的确在这里看到了它产的蛋。

鹦鹉

从动物与人类之间的关系来讲，猴子是通过模仿人类的言行举止来建立与人类的关系，而鹦鹉则是通过语言与人类建立关系。从某种角度看，鹦鹉与人类的关系更亲近、更密切。狗、马或象这类动物能与人相处和谐，很大原因是它们能够给人类带来某种功用和效益，更为物质；而鹦鹉则是因为能以鸟类特殊的形式带给人精神上的愉悦，排解人类的忧愁。孤独时，它充当伙伴；无聊时，它充当对话者。随着人类的情绪，时而欢笑，时而凝重，鹦鹉有时会冒出完全不相符的话语引人大笑，有时又讲出正确得令人惊奇的话语。鹦鹉这种没有思想的语言游戏，虽然有一种说不出的奇怪和滑稽，但它带给人的愉快，比那些空洞无物而又索然无味的演说强得多。或者正是这样对人类语言的模仿，让鹦鹉似乎汲取了人类的天性和生活方式中的某些东西，如爱憎分明、依恋、嫉妒、偏爱、任性，时而地自我赞叹、自我庆幸、自我振奋、自得其乐、自我叹息。如果得到人们的爱抚，它会非常温顺听话；假如遇到谁家办丧事，它也会学着低声呜咽，并模仿人们呼唤哀悼逝者的名字，唤醒人们心中的情感和喜怒哀乐。

第八节 啄木鸟

啄木鸟可能是被大自然强迫以捕猎为生的鸟类中，最辛劳的鸟了。它的一生都在工作，或者说一辈子都在苦干，其他鸟类或跑或飞，或守

候或出击的特长，皆是依靠其勇气和技巧的自由活动，而啄木鸟却似乎天生注定要辛苦劳作。因为只有把坚硬的树皮啄穿，剥开树干密实的硬纤维后，它才能找到隐藏其中的食物。它总是在为自己的生存忙碌，根本没有休息和娱乐的时间，即使夜里睡觉时，保持的也是白天劳动时的姿势。它不像其他空中居民那样能轻歌曼舞，也参加不了百鸟的合奏音乐会；它发出的叫声永远透着孤独，声调凄惨而悲凉，打破森林的宁静，似乎在哀怨地述说劳作的艰辛。它长得不好看，动作又急促，神态焦虑，再加上生性孤僻，从不合群，因此很少与同类来往。

大自然赋予啄木鸟的一切似乎造就了它一生凄惨清苦的命运。它的爪子有四根厚实强劲的脚趾，两个向前，两个朝后，连接腿后部称为“距”的那个脚趾最长，也最有力；它的脚趾前端长着粗壮的弯爪，后端则长在短而筋络强健的后脚胫上。啄木鸟用它有力的脚趾攀附在树干上，再绕着树干移动到各个方向。它的喙锋利、挺直，形状有点像铁锤，末端呈方形，纵向有一道凹槽，尖的那端扁平挺直，如同凿子。这天然的工具使它可以啄开树皮，划开树干，找到虫子的藏身之地；它的头颈粗短，强劲的肌肉配合发力并控制着喙的啄凿，直至把树干啄开一个洞，开出一条朝向树心的通道；它的舌头细长，状如蚯蚓，末端有又尖又硬的骨质，它伸出舌头时犹如一把锥子从啄开的树洞探进去，把虫子从洞里挑出来；它的尾巴由十根翎羽组成，弯曲向内，末端整齐，光秃秃的什么都没有，两边长着硬毛。为了在树上攀得更稳，便于更好地啄树，啄木鸟经常采用倒悬的姿势，这时，它的硬尾就充分发挥了支撑点的作用，很好地控制身体的平衡。啄木鸟在树洞内居住，稍微再挖空一些就成为它的巢穴，雏鸟生活在树洞里，虽然有翅膀，但注定得围着树干攀爬，进进出出也总是与树不相离。

法国森林里最常见和最普通的是绿啄木鸟，每当春天来临，在树林中就会听到它们刺耳生硬的叫声：“啼呀卡冈，啼呀卡冈……”叫声传出很远，尤其在它一冲一歇、一起一落飞行时特别喜欢如此鸣叫。它们飞行时，时而向下俯冲，时而向上直窜，在空中划出弯曲的弧线；尽管这样，也不影响它们在空中的停留能力。它们即便不能飞太高，也能飞跃相当宽的开阔地。在交配季节，除了习惯的鸣叫，它还会发出“啾啾”的声音，像是连续的大笑，喧闹着、持续着，可以重复30至40次。

绿啄木鸟待在地上的时间比其他同类要长，尤其喜欢在蚁穴附近转悠，因此人们总能在蚁穴附近发现它，并将它捕获。它守候在蚂蚁路过的地方，伸出长舌头平摊在路面上，一旦感觉到舌头上爬满蚂蚁，就卷起舌头吞下这些小生物。如果天气寒冷，蚂蚁大多不外出，啄木鸟就会用脚爪和嘴在蚁穴上方扒开一个缺口，把舌头伸到里面，从容地将蚂蚁及其幼虫一网打尽。

绿啄木鸟的其他时间常攀附在树上，不停地啄它攀缘的那棵树。它的工作积极而勤勉，干枯的树皮被它全部剥下。从很远的地方都能听到它啄木的声响，甚至连它啄木的次数都能数清。人们很容易接近它，遇到猎人前来，它不会飞走，只是绕到树干的另一侧。有人说啄木鸟在树身上啄几下就会跑到对面去看看，是想知道树干是否啄透，但事实并非这样，它到树的另一面是为了截捕虫子，因为虫子经它一啄全都惊得四散逃跑。据说，啄木鸟可以根据啄木的声音判断出树木的空心位置，以及里面是否会有虫，或是清楚哪里有个洞穴可以用来筑巢。

被虫蛀空的树洞是绿啄木鸟最常选择的筑巢地，这些树洞离地约有五六米高。松柳、垂柳等木质比较松软的树木是它的最爱，它很少把巢穴筑在橡树、棕树的树洞里。雌啄木鸟和雄啄木鸟一起努力不停地工作，齐力协力啄穿树木并找到树心，然后将之挖空，再把树洞扩成穴，把碎木屑及木渣都用脚清理到洞外。有时它们会把树洞挖得很深而且曲曲折折，阳光也很难照进去，它们就在黑暗的巢穴里繁殖后代，哺育幼鸟。绿啄木鸟每次的产蛋数是5枚，蛋壳呈淡绿色并带有黑斑。绿啄木鸟的幼鸟很小就会爬树，然后才慢慢学会飞行。雌啄木鸟和雄啄木鸟出双入对，几乎不会分开，而且它们睡觉的时间比别的鸟都早，一直要在鸟巢中待到天明。

第九节 鹳与鹭

鹳

通常翅膀大、尾巴短的鸟类都有持久飞行的能力，鹳也是这样，它

飞行时，头部朝前探去，双腿朝后伸直，看起来像舵一样，能飞得很高，哪怕遇到暴风雨也能长途飞行。每年的5月8日到5月10日，我们可以看到鹳飞往德国，在此之前它们一直停留在法国各地。16世纪瑞士的医生、植物学家，现代动物学、目录学奠基人孔德拉·格斯纳说，鹳在四月份来到瑞士，有时还可能更早一些，而它们在二月末或三月初来到阿尔萨斯。鹳是春天的使者，它们的出现预示着春天的到来。它们总是会回到原本居住的地方，如果旧的巢穴被破坏，它们会用树枝和草茎重新筑造一个新的巢。它们往往把巢建在高高的顶端，如钟楼的雉堞上、大树的顶端或陡峭的岩石顶。贝隆生活的那个时代的法国，人们在房顶上放置车轮，吸引鹳来筑巢；德国和阿尔萨斯的一些地区，到现在还保留着这种习惯；在荷兰，人们会在建筑物的顶上放置方形木箱，以吸引鹳来筑巢。

鹳休息时单腿站立，脖颈蜷曲，头向后面缩，靠在肩上。它的视觉非常敏锐，轻易就能发现猎物。如青蛙、蜥蜴、游蛇等爬行动物，很难逃过它的眼。因此，它常常会在爬行动物较多的沼泽地、水边或潮湿的山谷中捕食。

鹳走起路来，步子很大，也很有节奏，姿态与鹤相似。鹳在生气或不安时会反反复复叼啄，发出“咯咯”的响声，人们据此造出了两个象声词——噼噼啪啪和咕噜咕噜，而古罗马人彼特罗尼乌斯将其称为“响板之声”，更是恰如其分。

鹳天性温和，野性不太强，也不怕人，因此很容易被驯化成功。它在人类的园子里生活，可以为我们清除园子中的虫子和爬行动物。鹳很爱清洁，总会去偏僻的地方排泄；它总是一副无精打采的样子，看起来似乎有几分淡淡的忧伤。不过，它也会有欢快的时候，一旦有儿童来到它面前，它会跟他们一起玩耍嬉闹。鹳经过驯化后，寿命会有所延长，并且能抵御严寒的冬季。

鹳在被驯化后，被人类赋予了不少优良品质：性格温和、忠诚孝顺、和睦友爱。鹳会花费很长时间来哺育子女，照顾它们，一直等到子女长大或者有能力自卫和捕食时才会离开；幼鹳离开巢穴之后，在空中学习飞翔时，母鹳会用自己的翅膀辅助它们飞行。一旦遇到危险，母鹳

会不顾一切地保护自己的孩子；如果母鹳救不了它们，宁愿与孩子一起死也绝不会抛弃它们自己逃生。人们发现，鹳非常依恋照顾它的主人，对主人充满感激之情，鹳在经过门前时常常会发出一些声音，似乎是在告知主人它回来了；出门时也会有同样的表示。不过这些品质还不是最重要的，更让人惊讶的是，它们对老弱的同类总会表现出特别的关爱和照顾。人们经常看到这种现象：年轻而健壮的鹳会将食物送给待在巢内疲惫衰弱的鹳食用。这是否只是偶然的现象我们暂且未知，或者正如前人所说，鹳有着尊老敬老的本能，造物主将人类时常会违背的道义赋予它们，是为了给人类树立一个好榜样。历史上，希腊人制定赡养父母的法律时就以鹳的行为为依据，这个法律的名称就叫“鹳”；阿里斯托芬还以此为题材，创作了一部针对人性的讽刺剧。埃里安是一位公元3世纪的作家，曾写过《动物史》，他曾肯定地说，鹳的这种优良品格是埃及人尊重并崇拜它的重要因素；直到今天，人们也相信鹳在哪里安家就能给那里带来幸福，这或许是受了古人的影响吧。

鹭

我们看到的鹭总是一副痛苦不安的模样，而且带着些许的忧伤。等待是它们仅有的谋生手段，埋伏在同一地方，连续几小时甚至几天一动不动地等待猎物的出现，看起来好像不是一个活物。若是通过望远镜观测鹭，就会看到它单脚站立在一块石头上，好像睡着了似的，身子挺直，脖颈蜷曲在胸腹和腹部，头和喙窝在肩膀之间；若是它开始变换移动，那就表示它将要采取另一种感觉更加不自然的姿势：它走入淹至膝部的水中，头插到双腿之间，以便能抓住游过来的小鱼或者从此处经过的青蛙。只是它的行动常常受限，就只能待在那里静静等待猎物自投罗网，因此会长时间挨饿，有时甚至会因食物不足而被活活饿死，因为当水面结冰之后，它们没办法迁徙到气候暖和的地方去。一些博物学家认为鹭是候鸟，冬季离开，春天返回。这种观点无疑是错误的，因为我们一年四季都会看到它们生活在法国，即使是最严寒、最漫长的冬天也是一样。不过，因为水面结冰，它们会被迫离开习惯的沼泽与江河边，转移到温暖的泉水旁。这也是它们最好动的时期，它们在那里来回跋涉希望改变自己的处境，但始终只是在同一地区活动。

天气变冷时，鹭开始慢慢聚集起来，它们似乎能忍受饥饿的威胁，还能忍受寒冷的摧残，但仅是依赖自己的耐心和节制挺过去。而与这种淡漠的品质相伴的是厌世的思想，一旦人们捕捉到它并关起来，它会连续两个星期不吃东西，就算人们把食物强塞进它的嘴里，它也会吐出来。显然，这种囚禁激发了它天性中的忧郁，这种天性战胜了它求生的本能。求生本能是大自然赋予所有动物重要的技能，可是冷漠的鹭却不是这样，它即使面临死亡也不颓废，就算死去也不抱怨，更不会留下遗憾。

除了孵卵外，鹭的生活总是凄惨而孤独，它仿佛不懂什么是快乐，也不知道如何避免痛苦。在天气最恶劣的时候，鹭独自暴露在风雨之中，站在小溪边的木桩上，或者站在被水淹没的一个土丘上；其他鸟在这种情况下都会躲进树丛中，如秧鸡会钻进茂密的草丛里，蒲鸡则钻进芦苇中，只有鹭可怜兮兮地待在路边，任凭风吹雨打。

尽管鹭有着一双大长腿，却于奔跑并无助益，白天的大部分时间，它的长腿只是起到支撑身体的作用，以便能好好地休息，它的休息时间和睡眠时间相似。夜晚时，它会多飞一会儿。无论在什么季节、什么时刻，我们都能听见鹭在空中的鸣叫，它发出的声音单一短促而尖锐，比雁发出的声音要短促得多，而且带点哀鸣；当它觉得痛苦时，鸣叫声就会拖长，音调也更为尖锐，并且非常刺耳。鹭的飞行能力很强，它在飞行时腿向后伸直，无论是在飞行时还是栖息在树上时，都习惯于把颈收缩在肩膀之间，呈驼背状。

第十节 鹤、野雁与野鸭

鹤

鹤的飞行高度是许多鸟类无可比拟的，而且它们飞行时秩序井然，几乎保持一个等边三角形的队列，仿佛是为了更容易劈开气流，以减少空气阻力。当风力大到有可能会打散它们的队列时，它们就会紧密地挨挤在一起。若是遭遇到鹰的袭击，也会如此。它们经常在夜晚飞行，还

未见到它们的身影就先听到它们响亮的鸣叫声。在夜间飞行时，领头鹤会一直鸣叫，引导着鹤群的行进路线，整个鹤群都会附和，仿佛在表示自己正紧紧跟随其后，没有离队。

虽然鹤群飞行时的队形会有各种变化，但总能持续很长的时间。仔细观察会发现，鹤群不同的飞行方式预示着天气情况和温度的变化。鹤能飞得很高，自然视野更为开阔，也就更能感受到远处气象的变化。鹤群若在白天鸣叫，预示着有雨；若是叫声嘈杂而尖利，则表示暴风雨即将来临。若是看见它们在清晨和傍晚安然地飞翔在天空，就是天气晴好的征兆；反之，如果鹤群降低高度，甚至落到地上，则表示暴风雨即将来临。鹤起飞时相对吃力，需要先跑几步，之后张开翅膀飞起一点，接着才能展翅飞翔，并快速而有力地挥动双翼。

夜晚，鹤停在地面并聚集在一起歇息，同时还会设置岗哨，由此，我们也可以看出鹤的谨慎和高度的警惕性。鹤睡觉的时候，通常会把头插进翅膀中，但是领头鹤是不能休息的，它需要担任警戒的任务，把头高高扬起，一旦发现危险，就发出报警鸣叫声。普林尼曾说，鹤群为了满足迁徙才选出领头鹤，但我们不能将之看作是某种权力或者被迫接受，如同人类社会一样，而应该认为那是鹤群有交往的智慧，能聚集在一起，秩序井然地接受领头鹤的引导，以便能够顺利完成迁徙。因此，亚里士多德把鹤称为结群共乐的鸟类之首。

初秋时节，天气慢慢变冷，鹤也进入了迁徙的季节，它们要转去更温暖的地区生活。多瑙河流域和德国境内的鹤都会选择意大利为迁徙地。在法国各个城市中，九至十月期间都很容易见到鹤，如果深秋时节的气候较为温和，它们会在法国待到十一月份，但大部分鹤群都只是匆匆从法国过境，等到第二年春天再从南方返回北方。

野雁与野鸭

雁常常在很高的地方飞翔，只有在雾天时才会贴地飞行。它们能够沉稳平和地飞行，悄无声息，挥动翅膀拍打着空气，在天空中缓慢移动。雁群飞行时跟鹤一样，也是保持着有序的队列，这样的编队飞行显示出雁的智慧，远远优于那些在迁徙中杂乱无序的鸟类。雁群的队列所

遵循的似乎是一种几何规律，这种排列既恰当又有利，雁的几何天性得以充分体现。对每只雁来说，这种排列既能跟随队伍并保持队形，又拥有充分的空间，能轻松自如地飞行；对于整个雁群来说，这样的队列既可以减少空气的阻力，又可以减轻飞行带来的疲劳。雁群一般排成两条斜线，前端合成一个角，看起来像是一个“人”字；当雁群的数量较少时，就只排成一列，看起来像是一个“一”字。不过，很少看到只有一列的雁群，通常情况下，每个雁群至少都有四五十只雁组成，每只雁都会准确地保持自己在队列中的位置。人字形顶端的位置往往是领头雁的，总是最先承受空气的阻力，若疲惫了就会到队尾休息，由其他雁轮流替代，在前面开道。普林尼曾经认为，雁的这种整齐飞行是经过思考后形成的，他饶有兴趣地描述：“任何人都能观察到雁群，因为它们是在白天飞行，而不是在夜晚经过。”

每年的10月15日前后，第一批野鸭就会到达法国，数量不多，好似先头部队；到了11月份，大量的野鸭蜂拥而至。这些野鸭从北方地区而来，它们持续飞行，从一个池塘到另一个池塘，从一条溪流到另一条溪流。这同样是猎人开始忙碌的季节，他们对野鸭展开大面积猎杀，有时候是白天搜索，有时候是傍晚埋伏，或者使用各种圈套和大网进行捕捉。不过，野鸭的警惕性也是很高的，猎人并非轻易可以得手，必须使用计谋，以偷袭、引诱或欺骗等各种手段才能将之捕获。当野鸭需要在某个地方降落时，会先在空中盘旋几圈，似乎是在侦察有无危险存在。等到确定不会有敌人出现时，它们就会越飞越低，从水面斜着掠过，降落到宽阔的水域中。它们会一直与岸边保持一定的距离，以避免遭遇袭击；并且会有几只负责警戒放哨的野鸭，只要发现危险立刻发出警报，因此，往往是猎人还没来得及靠近，它们就已经飞走了。

傍晚是捕获野鸭的最好时机，野鸭群会在这个时候降落在水边，猎人选择在草丛中隐藏，或者以别的方式躲藏起来，然后将几只家养的母鸭放在河岸做诱饵。当听见有翅膀的扑打声传来，就表示野鸭将要飞来，于是抓紧时间捕捉先到的野鸭。深秋的夜幕降临较早，而野鸭群几乎和夜色一起到来，因此一定要抓住这个难得的机会。如果要想大面积地猎杀野鸭，就需要预先布网，而机关则由躲藏在隐蔽处的猎人控制。铺在水面上的网能覆盖相当大的范围，可以将被家养母鸭吸引而来的野

鸭一网打尽。猎捕野鸭的过程，需要猎人具备极强的耐性，一动不动地躲藏在隐蔽的地方，秋凉会令身体冻僵，染上风寒的可能性往往比捕到猎物的可能性还高。但是，猎杀的兴趣似乎总会占上风，猎人们尽管每次都一边朝冻僵的手上吹热气，一边发誓再也不要这样受罪了，可是就在发誓的当晚，他们就又计划着下一次的猎捕了。

第十一节 山鹬与土秧鸡

山鹬

山鹬可能是所有候鸟中最受猎人喜欢的猎物，因为它的肉质很好，味道鲜美，且容易捕捉。每年的10月中旬，山鹬会和斑鸠一起来到法国的森林，它们在狩猎的季节来到这里，大大提高了人们的猎物数量。整整一个夏季，山鹬会一直待在高山上，等到第一场霜雪之后，它们才会下山。从10月初开始，山鹬离开比利牛斯山峰和阿尔卑斯山峰，前往内地丘陵的树林中，一直飞到平原上。

天气不好的时候，山鹬可能会在夜间飞行，也可能在白天飞行，它们总是一只接着一只，或者两只一起，但不会像大雁那样成群结队。它们待在大篱笆、矮树丛和乔木林中，土壤肥沃和布满落叶的树林是它们特别喜欢的，它们整天栖息在那里，非常善于隐藏，只有猎狗才能把它们赶出来。一到夜晚，它们就会从树木茂密的地方离开，飞到林中的空地上，然后在树林的边缘寻找柔软的草地和潮湿的沼泽，在那里洗掉寻找食物时沾到身上的泥土。山鹬是没有个性的鸟，它们的行为习惯差不多相同，整个种群的习性决定了它们的个体习惯。

山鹬从树林里飞出来时，我们能听到它扑打翅膀发出的声响，它笔直地飞出乔木林，但在经过矮树林时，就不得不转弯，然后降落到灌木丛中，以便能躲过猎人的追踪。山鹬的飞行速度很快，但不能飞太高，也无法飞太久，飞行途中常常猛地落下，就好像失去控制而跌落一样。它的动作敏捷，因此在地上逃脱起来更方便，当它落到地上后，会立即快速地奔跑，但很快又会停下来，抬起头四处张望，观察是否会有危险

存在。普林尼将山鹬敏捷的奔跑与山鹑做对比，因为山鹑也有类似的躲避危险的行为；当人们想要在山鹬落下来的地方寻找它时，它早已经跑得不知所踪了。山鹬在繁殖期，通常是夜间结合，白天分开。雄鸟在发情时会不停地飞翔，傍晚时分飞到树林的上空寻找雌鸟。然后，它们会在地面上交配。它们在枯枝落叶中或者小灌木丛的下面筑巢，筑巢的材料主要是枯树枝、干草和干树叶等。雌山鹬每次产蛋3至4枚，孵化时间大约23天，小山鹬的食物主要是蚯蚓或鳞翅目等昆虫的幼虫。

土秧鸡

在潮湿的牧场上，从草开始生长到收割的这段时间，青草最茂密的地方常常会发出一种短促而尖厉的叫声。这种声音有点像我们用手指拨弄梳子齿发出的声响。若是人们寻着声响走过去，那声音就会消失，过一会儿又从不远的地方传出来。人们曾误以为那些声响是某种爬行动物发出的，但它其实是土秧鸡的叫声。土秧鸡这种鸟极少飞行，而是在地面上快速行走，穿过茂密的草丛，并留下清晰的足印。5月10日至5月12日这几天，我们在法国就能听到土秧鸡的叫声，也同时能听到鹌鹑的叫声，因此，土秧鸡和鹌鹑看起来似乎是一起出现又一起离开。土秧鸡的体长约有30厘米，头部小小的，有着非常显著的斑纹。蚯蚓、昆虫和植物嫩芽是土秧鸡的主要食物。

土秧鸡动作敏捷，十分灵活，遭遇猎犬追逐时，它常常会让猎犬靠自己很近，然后在即将被逮住时奇迹般地安全逃脱；它还会在逃跑的过程中，突然停下来缩成一团，而猎犬则因为控制不住速度，无法马上停下来，直直冲到它前面很远的地方去，等猎犬再次回头，土秧鸡早已逃之夭夭。据说，土秧鸡正是利用了对手的失误，然后沿原路返回，成功摆脱敌人的追击。只有在最危急的时候，土秧鸡才会振动它的翅膀飞起来逃逸；不过它飞行的姿势非常笨拙，并且飞不太远，一般飞一会儿就会落下来。但是，如果想要在它落下的地点去寻找它，往往徒劳无获，因为等我们赶到它落下的地点时，它早就已经跑出百步之外了。我们也因此得出，土秧鸡善于用飞快地奔跑来弥补其缓慢而笨拙的飞行，它利用双足的时候要比利用双翼的时候多。另外，它总是以茂密的草丛作为掩护，自在地奔跑在牧场上和田地间，而且它的奔跑路线变化莫测，往

返交错，没有规律可循。它的身体十分细瘦，所以能更好地穿梭在芦苇和沼泽地中。

不过，当迁徙的季节到来，土秧鸡也能拥有像鹌鹑那样不可思议的力量，可以飞行很长一段距离。它们一般是在夜间飞行，借助风的力量飞到法国南部各省，并从那里飞越地中海。显然，跨越地中海对它们而言是一件风险相当大的事，会有大部分土秧鸡葬身海底，因为人们注意到，它们返回时的数量比出发时减少了很多。

第十二节 凤头麦鸡与鸻

凤头麦鸡

凤头麦鸡是一种天真活泼的鸟儿，起飞时会叫上两声，在夜间飞行时，它也会不时地鸣叫。它的翅膀强劲有力，既能连续飞行很长时间，也能飞得很高。当它降落到地面时，便会快速跳跃，或者边跳边飞地将整个地段巡视一遍。

凤头麦鸡还特别喜欢嬉戏玩耍，哪怕是在空中飞行也呈现出多种姿势，而且无论哪种姿势都能保持很长时间。它的敏捷和灵活远超其他鸟儿，除了侧身飞行，还能仰腹飞行，因此对“飞行高手”这一称谓当之无愧。

凤头麦鸡在气候渐渐转暖时，成群结队地来到牧场，在绿色的麦田里嬉戏。每天清晨，低洼的草地上落满了密密麻麻的凤头麦鸡，它们以特殊的技能将隐藏在土里的蚯蚓挖出来。凤头麦鸡一旦发现蚯蚓翻出来的小土球，便会轻轻扒开它，蚯蚓的洞便藏于其间，接着，它们会用足不停踩踏附近的地面，然后静静等待和仔细观察，不久，地下受到惊吓的蚯蚓开始钻出来，稍稍露头，就会被凤头麦鸡捉住吃掉。到了夜晚，凤头麦鸡开始展示它们其他的技能：它们在草地上来回奔跑，用脚去感受正在地面活动的虫子，再捉住它们饱餐一顿；夜宵享用完后，它们会到水塘或小溪边将喙和爪子洗干净。

秋雨霏霏之际，成群结队的鸻在法国各地出现，它们伴随雨季而来，所以又被称为“雨鸟”。它们和凤头麦鸡一样，喜欢在潮湿的草地和淤泥地寻找昆虫或蚯蚓；鸻不会总是待在同一地区，也很少在同一地点停留一昼夜以上。由于数量众多，它们每到一个地区觅食，会将可以吃的小动物一扫而空，然后再转移到另一个地方。当第一场霜雪降下时，它们便不得不离开法国，迁徙到气候更温暖的地区去。

鸻在地面上时，并不会安静地待着，而是不停地忙着觅食或者活动。鸻群进食时，总有几只担任警戒放哨，稍有风吹草动，“警卫”就会发出尖叫声向同伴报警。它们顺风飞行，队列有很明显的特点：并排飞行，排成横排，在空中形成非常密集宽广的横断面，有时会是几个平行的横断面队列；横向很宽，但纵向又很窄。

第十三节 鹈鹕

鹈鹕之所以引起很多博物学家的兴趣和关注，一方面是因为它奇特的相貌，个头较大，喙的下面长着一个大食囊；另一方面，在古代的传说中，“鹈鹕”这个名称有着很高的声望，有一些民族的宗教将其奉为圣物，赋予了鹈鹕慈父的形象，因为它可以撕开自己的胸脯用鲜血来喂养孩子。事实上，这个传说原本是古埃及人用来描绘秃鹫的寓言，把它用在鹈鹕身上并不合适，因为鹈鹕的生活其实是很富足的；与其他以鱼为食的鸟相比，它多了一个可以用来储存大量食物的大口袋。

鹈鹕的个头和天鹅差不多，有的甚至比天鹅还大一些。如果信天翁的身子没有那么宽，火烈鸟的双腿没有那么长的话，鹈鹕就称得上水禽中体形最大的鸟儿了。鹈鹕的双腿虽然较短，但翅膀展开之后的宽度能达到三四米，因此它能在空中自由地飞行，而且能在空中悬停、飘浮很久；它轻易不出动，一旦采取行动就会垂直扎进水中，开始对鱼类的追逐。通常情况下，被它锁定的目标猎物是逃脱不了的，因为它出击时力量很猛，宽大的翅膀拍击着水面，将水搅动起来，把鱼弄得晕头晕脑，难以逃脱。鹈鹕在独自活动时，就是以这种方式捕食。它们也有成群结队协同行动的时候：先是围成一大圈，一起游动并慢慢将圈子缩小，这

时困在圈子中的鱼就成为它们从容分享的猎物。

驯化鹈鹕比较简单，尽管它身体笨重，但性格活泼，也不怯生，喜欢与人类待在一起。贝隆曾在罗德岛见过一只鹈鹕在城镇中随意散步。德国著名学者库尔曼也讲述过一个著名故事：马克西米安皇帝出征时，有一只鹈鹕始终跟随着行军队伍，飞翔在队伍的上空。尽管它的翼展开时宽度达到4.6米（15英尺），但因为有时飞得太高，所以看上去只有一只燕子那么大。

第十四节 军舰鸟

军舰鸟是所有带羽翼的飞行者中飞行最出色、最强劲有力也是飞得最远的，它们的双翅展开后很大，在空中飘浮，看起来没有明显的动作，仿佛在湛蓝的天空中悠闲地游弋；一旦机会到来，便如利箭般飞速冲向猎物。每当暴风雨来临，像风一样轻灵的军舰鸟就会冲上云霄，飞到暴风雨的上方以寻求安宁。军舰鸟在海上四处游弋，不仅飞得很高，而且飞得很远，在辽阔的海洋上飞翔数十千米，只需要一口气就能飞完；若是白天的时间不够，它们就会在夜晚继续飞行，一直飞到食物丰富的海域才停止。

鱼群在进行远洋迁徙时，如飞鱼，为了躲避金枪鱼和剑鱼的追捕，常常会跃出水面，这正是军舰鸟最好的机会，也正是这种迁徙的鱼群引领着军舰鸟远渡重洋。有时候，迁徙的鱼群非常密集，它们在水中游动的声音会很大，而且海面也呈现白色，军舰鸟在远处就可以观察到，于是从高空俯冲而下，再转而沿着海平面飞行，紧紧贴着海面，但身上并不会沾上水，一边飞行一边捕鱼，有时用喙叼，有时用爪子抓，还有时喙和爪子一起用。

军舰鸟通常出现在热带地区或者热带以南地区的海洋上，军舰鸟能很好地控制热带鸟，它们经常驱使多种热带鸟为自己提供食物，特别是千鸟，它们会用翅膀拍打千鸟或用喙去啄千鸟，迫使其将吞下去的鱼吐出来，所以海员们又把军舰鸟称为“战鸟”。对于这个名字，军舰鸟受之

无愧，因为它们有时甚至会攻击人类。

军舰鸟可以这样肆意妄为，既是由于它的飞行速度和强劲力量，也是因为它贪婪的天性。它的身体构造使其适合作战：锋利的爪子，前端长有尖锐弯钩的喙，又短又粗的腿，全身长满和猛禽一样的羽毛，飞行速度很快，视力特别敏锐，这些特性使军舰鸟看起来跟鹰似乎有一点相像，因此也令它成为海上暴君。但是，从体形上看，军舰鸟更适合在水里生活，虽然人们几乎从未看到过它们游泳，但它们的脚趾有半圆形的蹼相连，因此它们接近于鲣鸟、鹈鹕之类的鸟儿，完全可以将其视为蹼足类。另外，军舰鸟的喙的前端是弯钩状的，而且十分尖，能在捕猎中发挥重要的作用，但与陆地猛禽的喙有较大区别，因为军舰鸟的喙很长，上面还有一点凹陷，弯钩位于喙的前端，看起来好像是分开的，和鲣鸟的喙很像，接缝处没有明显的痕迹。

军舰鸟的体形比鸡大一些，但它的翅膀展开时却有3至4米，甚至4米宽，它们就是借助这巨大的翅膀进行远程飞行的，甚至遨游在海洋的上空。它们通常是航海者在枯燥旅程中所能见到的海天之间的唯一物种。不过，太长的翅膀也会带来烦恼，当它们落到地面，想要再次起飞会变得十分困难，很容易在尚未飞起来时就被人捉住。因此，军舰鸟只有站在突起的岩石上或者大树的冠顶，才方便顺利起飞。

第十五节 天鹅和鹅

天鹅

无论是动物社会还是人类社会，以往成就霸主地位依靠的都是暴力，但现在，却是要依循仁德来选取贤君。陆地上跑的狮子和老虎，天空中飞的鹰和鹫，都是以擅长使用武力在同类中称雄，统治手下依靠的也多是逞强和凶残；但天鹅却完全不同，它成为水上之王凭借的是足以创造一个和平水上世界的美德，如高尚、尊严、宽厚等。天鹅拥有的不仅仅是威严，还有力量和勇气，而且具备不滥施权威的意志和非自卫不随便使用武力的精神。虽然它的战斗力很强，也很容易获得胜利，但却

绝对不会主动发起攻击。它是水禽中提倡和平相处的君王，但在遇到空中的霸主时，它不会挑衅，也绝不会退缩，只会对鹰的来犯严阵以待。天鹅的翅膀就是它坚实的盾牌，它用力挥舞双翅以对抗鹰的尖嘴利爪，将鹰的进攻击退。在这样的抗击中，天鹅常常是获胜的一方。而且除了鹰这个劲敌外，其他好战的猛禽对天鹅都保持着足够的敬意，不敢冒犯。天鹅与大自然的一切和平相处，对于种类众多的水禽世界而言，它所做的不只是以君主的身份监护，更是以朋友的身份照顾着其中的大多数，水禽们似乎也都自愿臣服于它。天鹅像是这个和平王国的领袖，它要求的只是安宁和自由；它向别人要求多少，便会回馈多少，因此全体“公民”自然无须对这样的领袖产生惧怕。

天鹅的样貌妍美，体态优雅，浑身散发着高贵气息，这与它的天性正好相符，令所有看见它的人备感赏心悦目。它所到达的地方，都将它作为一个亮点，为这个地方增色添彩。人们都十分喜欢它，欢迎它。天鹅是所有飞禽中受人们怜爱最多的，大自然赋予它的俊美身姿、圆润形貌、高雅神态、优美线条、传神动作，让我们感叹于大自然能够创造出如此完美的生物，无论是忽而的英姿勃发，还是忽而的悠然忘形。总之，天鹅浑身散发出的魅力，让我们在充分感受它的优雅和妍美时由衷生出舒畅和陶醉，让人觉得它与众不同。天鹅还被人们描绘为爱情的代称——希腊神话中，美女海伦是由勒达和一只天鹅孕育，这只天鹅是宙斯幻化而成的。我们在上面讲到的一切，从某种角度上印证了这个美丽神话是有根据的。

当我们看见天鹅以它雍容而又潇洒自如的模样，在水面上敏捷轻快地活动时，就必须承认，它不但是水禽中的航行冠军，更是大自然创造出来的最天然、最完美的航行模型。的确如此，天鹅的长长颈项呈优美的弧线，丰满的胸脯挺直，似行驶中劈波斩浪的船头；它的腹部宽阔，仿佛船底；它的身体前倾，为的是能快速航行，越是向前就越是挺起，最后高高地翘起来形同船舳；它的尾巴就是它的舵，脚蹼则如船桨；它的一双翅膀迎着风半张，稍微鼓起，起着船帆的作用，推动着这艘有生命的船舶一直向前。

天鹅清楚自身所具有的高贵，并引以为豪；它也知道自己的美丽，故而洁身自好。它似乎总是将自己的优点尽可能地暴露于众，像是想要

引起人们的关注，博得人们的赞美。事实上也是这样，它的确令人百看不厌，当我们在远处看到它们成群结队行驶在浩瀚的海洋中时，它们犹如带着翅膀的船队，自在游弋；而当它们应和我们的召唤离开队伍，靠近岸边独自活动时，它们在人们面前不断展示各种优雅的动作，充分显现它们的妩媚与妍美，让人们尽情欣赏之余深感愉悦。

天鹅天生丽质，崇尚自由，而且不在人类能够强制或是幽禁起来的奴隶行列。天鹅无拘无束地生活在湖泊中，如果它不能充分地享受自由之乐，产生了被奴役、被囚禁的感觉，那么它会毫不犹豫地选择离开。它要自由自在地遨游于水面，要么沿着岸边散步，要么在岸边休息；偶尔会躲到草丛中，偶尔也会待在偏僻的港湾，然后再离开自己的住所，回到有人的地方，享受与人类共处的乐趣——它喜欢接近人类，视人类为自己栖身之所的主人和朋友，而非暴君。

天鹅在许多方面都优于家鹅，家鹅的主要食物只是野草和草籽，而天鹅则会寻找精致的食物。它通过使用计谋，借助各种姿势捕捉鱼类，而且使的是巧力以达成目的。对于来犯的敌人，天鹅善于避开或者抵抗，一只在水里的天鹅是不会害怕一只强壮的狗的；它挥舞翅膀的力量，连人的腿也能打断，由此可以想象其力量的猛烈和强大。总而言之，面对任何的攻击或挑衅，天鹅从不会畏惧，因为它的勇猛程度能与它的力气和灵巧相媲美。

经过人工驯养后的天鹅，叫声粗浑而不嘹亮，这是一种类似哮喘的声音，而且非常像俗语中说的“猫念咒”，古人通过谐音“独能嚷”将这种音调表示出来，听起来好像是在恫吓或者是在表达自己的愤怒。在古人的描述中，深受人们赞扬的像是天籁之音的天鹅和鸣声，明显依据的不是经过驯养仅能发出嘶哑鸣声的天鹅。我们发现，野天鹅较好地保留了它们的天然特性，它拥有充分自由的圆润音调，在它的鸣叫声中，我们可以听出一种有节奏又婉转悠扬的歌声，而且响亮如军号一般。但与那些具有柔和又多变嗓音的鸣禽相较，野天鹅的鸣叫则显得有些尖锐而且单一了。

古人的认知中除了把天鹅当作神奇的歌手外，还认为天鹅是唯一会在弥留之际歌唱的生物，它们用歌声感怀生命，将和谐的声音视为生命

终结的前奏。在他们的描述中，天鹅发出柔和感人的声音，是在它面临死亡时，作为对生命的深情告别。这种声调如怨如诉，低沉悲怆，这是它们自谱的挽歌。古人说，只有在旭日东升、风平浪静的时候，人们才能听见这种歌声，甚至还有人看见众多的天鹅一起鸣唱挽歌，在音乐声中慢慢死去。在古代传说中，在自然史虚构的逸闻中，这无疑是最动人的，也是被人们赞美和重复得最多的，甚至许多人认为这就是事实。这个传说也一定程度上禁锢了古希腊人活跃而敏感的想象力：无论诗人还是雄辩家，甚至哲学家都欣然接受这个传说，他们认为这是一件非常唯美的事情，没有必要去怀疑它的真实性。因此，对于他们杜撰出来的这则寓言，我们也应该予以原谅，它确实动人和可爱，其价值也远远高于一些枯燥的史实。对于敏感的心灵，这是非常有效的慰藉。在这样的比喻中，天鹅显然不是在赞扬自己的死亡，所以每当论及一个伟大天才临终前的最后辉煌时，人们总是无限感慨地讲出这样一句动人的话："这是天鹅之歌。"

鹅

在各种动物中，占据首要地位的动物享受了所有关注的目光和赞美，留给次等动物的，则只有在比较后所得出的不屑眼光和鄙夷态度，比如驴和马，再比如鹅和天鹅。在这样的比较中，鹅和驴都没有得到公平的对待。低等动物似乎天生就只能遭受漠视，不管它们拥有什么样的品质，只要将之与头等动物相比，它们就变得失去价值。其实这种比较是一种不合理的对照，所以我们暂且把天鹅高贵的形象放在一边，我们将会发现，鹅在家禽中是很了不起的一员。

鹅的身形肥胖，头大而喙扁，脖子长，尾部短，脚大有蹼。它们迟缓的步履，挺拔的身姿，以及整齐干净、带着光泽的羽毛和它合群念旧的特性，使它很容易产生对人类的强烈依恋和长久的感激之情，而且，它很早就以警惕性非常高而著名。大约三四千年前，人们就驯化了鹅，鹅以青草为食，耐寒力、合群性及抗病能力都很强。鹅生长快，寿命也比其他家禽长，这些都说明，鹅在家禽中是极有益的一员。在对人类的贡献上，鹅除了鲜美的肉质之外，还能提供给我们精致的羽毛，这是用来制作衣服的原料；它的另外一种羽毛，还可以用来制作毛笔，记录下

我们的思想——此刻，我正用这样的笔写下对它们的赞美之词，

养鹅不需要花费我们多少的心思，更不用精心照料：它能够与其他家禽和平共处，而且可以忍受与其他家禽生活在同一个禽棚中，虽然这样的生活方式，特别是这样的强制性对它的天性发展有影响。如果想要饲养更多数量的鹅，就必须选择靠近水边或者沙滩的地方。这些地方有宽阔的空地，还有鲜美的青草，让它们能够自由自在地吃草、嬉戏。但是不能让鹅群进入草场，它们的粪便会对嫩草造成污染，它们在嬉戏中还会用喙将小草的根拔起来。此外，也不能让鹅群靠近麦田，等到收割完之后，再放它们进入麦田活动。

第十六节 孔雀

假如在动物王国中不是以力量，而是以美来决定统治权，那么孔雀会是当仁不让的君王。除了孔雀之外，还没有哪一种鸟雀能把大自然的慷慨馈赠集于一身。孔雀有着健壮的体格、庄重的相貌、优雅的举止、高贵的神态，这一切都在宣告它的独特存在。孔雀的冠羽轻柔，有着丰富的色彩，不仅点缀头部，而且令它增高不少，却丝毫不会成为它的累赘。它的无与伦比的羽毛汇聚了天地间的所有颜色，好比一场视觉盛宴，如美丽的鲜花，像夺目的宝石，似绚烂的彩虹，令我们眼花缭乱、赏心悦目，又惊叹不已。

大自然赋予孔雀的不仅是天地间的各种色彩，让它成为大自然的杰作，更是通过不可模仿的画笔令其格外协调、细腻和朦胧，描绘出一幅独一无二的画。在这样一幅画作中，造物主将明暗、冷暖等不同的色调巧妙地结合起来，提炼出一种异常瑰丽的色彩和光线效果，即便是技艺高超的艺术家也无法模仿，更无法描绘。

雄孔雀会在春季里独自行走，一旦雌孔雀出现在它的面前，它会将羽毛完全呈现，变得更加美丽——目光中满是兴奋，表情丰富，头上的冠羽晃动不停，表达着内心的情感；长长的尾羽徐徐展开，如炫耀财富一样展示着自己的美丽；羽毛在阳光的照耀下发出耀眼的光泽，产生更

柔顺、动人而多变的色彩；它的举止引起的微妙变化和转瞬即逝的束束反光，不断被新的微妙变化所代替，这种新的光泽与其他光泽相比是如此的与众不同，总令人惊叹无比。孔雀将自己的脑袋和脖颈朝向后面，将这绚丽的色彩更加优雅地展示出来。

这个时候的孔雀明确自己的优势，它好像只是为了向缺乏这种优势但同样可爱的同伴致敬。它在爱情洗礼下的动作更加优美，举止更加优雅，充分显示了它的生动风韵。

这些鲜艳夺目的羽毛尽管比任何花朵都美丽，但也会跟花朵一样枯萎。这些羽毛每年都会脱落，孔雀似乎害怕自己羽毛脱落的样子被看见，因此在这个阶段总是选择待在阴暗、僻静的地方，以躲避人们的视线，直到第二年春天新的羽毛长满后，它才会身着新装再次走到阳光下，接受人们的赞美。有人说孔雀对赞美非常敏感，所以人们若是希望它开屏，正确的方式就是予以专注的目光和溢美的言辞。反之，如果没有人在意它的美丽，甚至漠不关心、无动于衷时，它就会收拢自己的羽毛，向那些不懂得欣赏的人隐藏起自己五彩缤纷的美丽。

第十七节 山鹑和幼鹑

尽管雄山鹑无须孵化幼鹑，但它会与雌山鹑一起承担照顾幼鹑的任务。它们共同照顾子女，对它们进行生存教育，教导它们知道哪些是能够吃的食物，引导它们学会用趾爪在泥土中寻找食物。我们常常能看见它们蹲下来紧挨在一起，用翅膀护住自己的孩子，这些幼鹑从父母的翅膀下伸出小脑袋，睁着一双炯炯有神的小眼睛看着这个世界。在这样的情况下，山鹑是不舍得抛下孩子离开的，同样，即使是捕猎欲望很高的猎人也很难下定决心打破这种十分感人的画面而猎杀它们。如果此时出现一条猎犬，而且又在离它们很近的地方，雄山鹑会发出特别的叫声，还会马上跑到三四十步开外的地方站住，拍打着翅膀向猎犬一次次冲去，保护孩子的决心激发了它的勇气。

除此之外，为了拯救自己的孩子，山鹑还会采取一种更谨慎、更复

杂的方法引开敌人。我们会看到，雄山鹑在引起敌人的注意之后就开始逃跑，它耷拉着脑袋，跑起来的脚步也略显沉重，目的仿佛只是为了麻痹敌人，让敌人以为轻易就可以捉住它，而事实上雄山鹑总是能跑到比较远的地方，敌人紧随其后却难以捉住它，就这样诱使敌人离幼鹑们越来越远，从而保证了它们的安全。雌山鹑则在确认安全之后，将躲藏在草丛中或者落叶中的儿女们集中起来，趁着猎犬只顾着追赶雄山鹑还未回头时，将孩子们带往安全地带，移动过程中它们也不会发出任何的声响。

第十八节 嘲鸫、夜莺和戴菊莺

嘲鸫

嘲鸫是自然界飞禽中最出色的歌手，某些方面甚至比夜莺更加优秀。它跟夜莺一样，用歌声吸引人们的关注，还以模仿其他鸟类的声音为乐，这也是“嘲鸫”这个名字的由来。它的鸣叫只是为了让自己的嗓音训练得更为完美，不知疲倦地通过各种方式练习自己的歌喉。

嘲鸫不仅认真用心地唱歌，而且唱得十分生动，或者更准确地说，它是在借助歌声表达自己内心的情感。嘲鸫通过歌声自娱自乐，还伴以有节奏的动作，总是用天然的或者后天学习到的调子不断丰富自己的歌喉。它通常会先抬起翅膀，然后低下头去，接着就会放声高歌，展现生动而轻盈的唱腔。只是在以这种奇特的方式持续练习一段时间之后，它才能够协调好各种动作。它发出的声音是一种很有节奏的旋律，而且以挥舞的翅膀应和节拍。

嘲鸫在飞行的过程中，能在空中描绘出很多道相互交错的圆圈，它会沿着一条上升、下降，然后沿着不断上升的抛物线飞翔，一次又一次重复，似乎是在通过这种方式展示自己高超的飞行本领。我们会发现，嘲鸫有时翱翔在树顶上空，逐渐减缓挥动翅膀的速度，直到一动也不动，似乎是在空中悬挂着一样。嘲鸫在飞行时也会唱歌，还有着高低起伏的变化，先是明晰、响亮，接着慢慢降下来，最后完全消失、沉寂，

如同一首优美旋律的结尾。嘲鸫身长大约有25厘米，灰褐色的羽毛，它们在灌木丛或者森林中生活。嘲鸫不停地歌唱，为的是用歌声宣告自己的领地。尽管嘲鸫没有引以为傲的外表，但它的美妙歌声完全能够弥补这一缺憾。嘲鸫是一种食肉飞禽，但它的食物主要是一些对农作物有害的昆虫。

夜莺

　　夜莺会让一个感情细腻的人联想到春天夜晚的美丽画面：空气清新，万籁俱寂，整个大自然都凝神静听夜莺的鸣唱并陶醉其中。我们所知道的其他会唱歌的鸟类，如云雀、金丝雀、燕雀、嘲鸫等，它们的歌唱在某些方面也许能够与夜莺媲美，当夜莺闭口停止歌唱时，它们也很乐于为人类贡献歌喉。这些鸟儿也都拥有动听的声音，有些嗓音柔和，有些技巧高超。但是，与夜莺的多种才能和变化多端的鸣唱相比，它们都会黯然失色。因此这些鸟儿的歌声从音域上讲，仅仅是夜莺歌声中的一段而已。夜莺从来不会重复歌唱，至少从来不会被迫重复。如果它重复了某一段的鸣唱内容，也会用不同的音调，让歌声变得更加优美动听。它能够唱出各种曲调，表达不同的思想；它能够把握歌唱的各种特征，善于通过对比来增强歌声的效果。

　　如果这位“春天合唱队”的领唱者要为大自然演奏颂歌，那么它会通过一连串音符抒发自己的感情：从虚弱的、含糊不清的音调开始，好似在对乐器进行调试的同时，唤起聆听者的注意；接着，它以万分的自信和激情，通过饱满的音调展示自己的各种本领。响亮的琵琶音、轻快的和弦、迸发的音群，全都是那样的清晰流畅；激越迅捷的突发鸣啭，清晰有力的发音，充满了阳刚之气；即便是哀怨的音调，也蕴含着柔和的韵律，优美动人，沁人心脾。它的歌声流露着自己内心的真情，令听者因共鸣而动容，唤起内心深处的忧伤。就是在这样的歌声中，仿佛让人们听到了一对幸福无比的伴侣正在诉说内心的喜悦。哪怕在不是那么动听的乐章中，也仍然能够听出它愉快的歌声。在心爱人的面前，它与羡慕、妒忌自己的那个情敌一起鸣唱，一争高下。

　　夹杂在这些多元乐章中的还有许多休止符，它们在不同的旋律中有力地组合在一起，产生了画龙点睛的效果。我们感受着夜莺美妙动人的

歌声，这是直抵内心深处的专注享受，并期盼每次都有不同的新感受，希望它能够令人更加愉悦。如果偶尔错过了几个音节，那么后面所听到的美妙歌声就不允许自己再次错过，因为那美妙反复的乐章能带给我们更新的感受，让人们满怀希望。

夜莺以它柔和美妙的歌声，以及有时能够持续不间断的鸣叫，令其他鸟儿无法望其项背。在夜莺的鸣唱中，从开始到结束我们能够听出16种不同的音调，并可以确认它不仅懂得即兴发挥，还能使音符反复多变。夜莺的音域宽广，歌声非常响亮，能传到方圆1千米之外，尤其是在天高气爽的夜晚，我们在很远的地方都可以听到它的鸣叫。

第十九节 戴菊莺

戴菊莺是体形极小的鸟儿，不仅普通的捕鸟网无法困住它，还能轻易逃脱各种笼子对它的羁绊。人们将它放在一个自认为关得很严实的房间里，但很快它就会消失无踪，因为哪怕房间里有极微小的洞，也是它的可乘之机。它来到花园，机灵地进入林间小路，转瞬就身影全无，它能够在树木草丛中最窄小的地方藏身。如果猎捕它时用枪的话，直径最小的铅弹对它来说都太大；想要捕获完整的戴菊莺，只能把最小的沙砾装入猎枪以此替代子弹。当人们用捕鸟笼、粘鸟枝或者细网捉到它后，放在手中几乎看不清它的样子；但这并非它不活跃的表现，事实上，当人们以为已抓住了它时，它早已跑得无影无踪了。戴菊莺的叫声非常尖厉而且刺耳，如同蝈蝈的叫声。亚里士多德曾经说它的歌声自在而动听，充满愉悦。显然，他是将戴菊莺和鹪鹩混淆了。

戴菊莺把巢穴筑建成空心的球形，将苔藓和蛛网牢固编织在一起，里面有柔软的绒毛做填充。雌戴菊莺在巢里产蛋，每次有六到七枚，一枚蛋卵只有一个豌豆大小。戴菊莺的巢常常选在树林中，有时候也会在花园中或者是宅院内的松树上。

戴菊莺主要以小型昆虫为食物，夏季时，它们在飞翔中捕捉小虫子；冬季时，则在各个隐蔽的地方寻找小虫子。另外，它们也会食用各

种小虫的幼虫，而且很擅于捕捉这些猎物。戴菊莺很贪嘴，身子又太小，以至有时候吃得太猛，会被噎住，甚至被撑死。夏天，它们也会以小浆果、小种子等为食。人们曾经见到它们在柳树洞中寻找食物，但从未在它们的嗉囊中发现过小砾石。

第二十节 燕子和雨燕

燕子

最早从南方飞到法国的燕子大约是在春分不久，无论3月初到4月初的这段时间是寒冷还是温暖，它们总会在这个时期到达法国。而在此之前，它们会先飞到中部地区，然后再飞到北部地区。

对于那些向我们报知春消息的鸟儿，我们都应该善待并且感激，因为除了报春，它们还会带给我们许多的帮助。我们要以保障它们的安全为基础善待这些鸟儿。多数人对这些鸟儿的保护出于偶尔，有一部分人甚至到了迷信它们的地步；但也有人沉浸于猎捕燕子带来的快感中，他们的狩猎没有别的目的，仅仅是为了提高自己的射击技巧或者为了娱乐。遗憾的是，这些无辜而天真的鸟儿似乎对枪声缺乏敏感，甚至在猎人向它们发起残忍的攻击时，它们仍然无法下定决心躲避。然而，人们对燕子的猎杀，造成的不只是对燕子的伤害，实际上也危害着人类自己的利益，所以这是十分荒唐而愚蠢的。因为是燕子帮我们消灭了库蚊、象虫等害虫，让我们摆脱了这些害虫对庄稼和森林造成的严重损伤，它们的出现会给某些地方带来巨大的损失，而燕子和其他食虫鸟类都可以帮助人类尽可能地降低类似损失。

燕子以它们在飞行中捕捉的各种有翅昆虫为主要食物，但由于这些有翅昆虫的飞行高度会随天气变化而改变，所以天气比较冷或者要下雨时，燕子需要贴着地面低飞，以便顺利地捕捉到食物。它们掠过地面，穿梭在植物的茎根间或者草地上，寻找这些昆虫；它们也从水面掠过，将半个身子浸入水中去捕捉昆虫；在食物十分匮乏时，它们还会与蜘蛛争夺食物，甚至钻进蛛网中，将蜘蛛一同吃掉。

燕子的飞行与夜莺的飞行有着显著区别：首先，燕子的飞行是闭着嘴的，而不是像夜莺一样张着嘴，因而不会发出低沉的“嗡嗡”声；其次，尽管燕子的翅膀相比其他一些飞禽有些短，力量不大，灵活度也不够，但它的飞行却更加轻捷，飞行姿态也十分优雅，这是缘于它的视力超强，可以看得很远，能够将双翅的全部力量发挥出来。可以这样说，飞行是燕子与生俱来的状态，也是它不可或缺的状态：它在飞行中进食、饮水、洗澡，甚至给幼鸟喂食的时候都是处于飞行状态。

燕子的行动或许算不上非常快捷，但它身体轻盈，灵活多变，既能向下急速直冲，又可以悠闲地滑翔。天空就是它活动的领地，它在空中自由地飞来飞去，尽情享受飞行的乐趣，它表达内心情感的方式是快乐的呢喃声。它时而捕捉飞来飞去的昆虫，将其锁定于自己的视线内，但不久后可能又会放弃这一只去追赶另一只昆虫，甚至飞行中又去捉第三只。时而掠过水面或者地面，去捕获那些由于下雨或者阴天聚集在一处的昆虫；时而凭借灵活的动作，避开猛禽的攻击。燕子可以一直保持最快的飞行速度并随时变换飞行方向，仿佛要在空中勾画一个变幻莫测的迷宫似的图案。它的飞行线路相互交错又相互纠缠，上升、降落，再上升、再降落，表现出变化多端、千姿百态的轨迹，让人无法用线条表示，更无法用语言或者笔墨描绘。

雨燕

雨燕虽然毫无争议的是真正的燕子，但它们有着许多比燕子更显著的特征。之所以这样说，是因为它们的主要特征有别于另一类燕子。雨燕的颈部、喙以及足趾都较短，头部和喉部较大，翅膀长，因而飞行速度更快，飞得也更高。不过，相比其他飞行敏捷的鸟儿，雨燕的飞行并不是完全主动，因为它们几乎不会在地面上降落，每当它们因为某种意外而落到地面，便会十分艰难地站起来，在小土埂上勉强慢行，之后爬到土丘或者石头上，竭力借助地势让自己的长翅膀发挥作用。它们起飞时会比较困难，这是由于身体结构的特别所致：它们的跗骨很短，休息时这个跗骨充当足后跟支撑在地面上，因此它们几乎是整个身子伏在地面上休息。它们长长的翅膀在这样的姿势中没有好处，反而成为一种障碍，只起到无益的控制平衡的作用。如果它们落下时的地面很平坦，而

非凹凸不平，那么雨燕便会成为笨拙的爬行动物；如果是坚硬平滑的地面上，更是寸步难行，哪怕是小小的位置改变，对它们来说都是异常艰难的事。因此，地面在它们眼中就成为难以跨越的障碍，令它们尽量小心翼翼地避开这个障碍。

雨燕将巢筑在我们的楼房中，它们希望的是有一个安定的住所，而不是更舒适或愉悦的野外住所。雨燕在城市中的住所，事实上仅仅是一个墙洞，洞口比洞底窄。它们最喜欢的是高处的洞，这能提升它们的安全感。它们外出寻找洞穴，有时选择钟楼和高塔，有时选择桥拱下，尽管桥拱下的洞不高，但从表面看上去，它们觉得那是一个藏身的好地方；另外，它们也会选择空心的树或者陡峭的岩壁筑巢，与翠鸟、蜂虎以及燕子等鸟儿为邻。它们如果选择好了一个筑巢点，那么每年就都会回到那里居住，尽管它们没有对住所做明显的标记，但它们仍然可以轻易辨认出来。根据多种因素推测，雨燕不会去占据其他鸟雀的巢穴，而是有其他的鸟雀占据了雨燕的巢穴，比如麻雀。在这种情况下，雨燕会轻声细语地请出不速之客，要回自己的巢穴。

雨燕是很怕热的飞禽，因此经常在中午温度比较高的时候，窝在自己高墙和岩石缝的洞中，或者是高矮的瓦片之间。清晨和傍晚，它们在空中漫不经心地盘旋，不是为了寻找食物，而是为了锻炼翅膀的力量。上午十点左右，它们会返回巢穴中，等到太阳落山之后，它们再成群结队地飞出巢穴，时而在空中勾画出无数的圆圈，时而排成一行，沿着同一条线路和方向飞行，时而环绕高大的建筑物盘旋。它们常常将双翼张开，但并不拍打，而是突然抖动双翅。我们尽管经常可以看见雨燕这样的姿态，却弄不明白它们每个姿势所代表的意图。

从7月初开始，从雨燕的一些行动中可以感知它们将要迁徙。它们开始聚集起来，数量急剧增多，在十几天的时间里，每到傍晚它们就会举行大聚会，数量也越来越多；它们常常绕着钟楼飞行。这些聚集在一起的雨燕不计其数，它们来自中部地区，仅仅是由此路过，等到太阳落山，它们就会大声鸣叫着飞向高空，在它们已经飞离我们的视线很久后，这种叫声在很长一段时间内不会消失。雨燕通常选择在树林中过夜，因为它们在树林中筑巢、捕捉昆虫。那些白天待在平原上的雨燕，甚至居住在城市中的雨夜，到了傍晚也会向树林飞来，而且一直待到深

夜。一段时间之后，在城市生活的雨燕也会聚集起来，所有的雨燕一起迁徙，结队前往气候更适宜的地方。

第一章 植物的概念与作用

植物，从广义上解释指所有非动物的生物，其与动物的本质区别有两点：第一，植物自己不会移动；第二，植物的养分依靠体内的叶绿素进行光合作用而获取。但上述划分也并非完整，因为简单植物和低等动物之间没有明显的界线。因此，为了能够对植物有正确的认识，我们需要对植物的狭义概念进行论述。从狭义上来说，植物指的是苔藓类、蕨类、裸子植物、被子植物等，此外，藻类和真菌类也可以归到植物中。

第一节 植物的细胞

众所周知，细胞是组成万物最基本的元素，因此大多数植物都由无数细胞组合而成。但不同的植物之间仍然存在着一定差别：有些植物仅仅由一个细胞组成，而有些植物的结构却十分复杂，由众多数量的细胞组成，这些细胞按照一定的顺序排列形成组织，各个组织又进一步连接成器官。

细胞壁指的是包裹在细胞外面的那一层厚厚的壁，它是细胞的组成部分，其主要成分是多糖类物质。细胞壁的异同，是植物细胞区别于动物细胞的主要特征之一。纤维素、半纤维素、果胶质等物质构成了植物细胞壁，它由胞间层（又称为中胶层）、初生壁和次生壁三个部分组成。

不同的植物、不同的部位、不同的功能以及不同时期的细胞壁，在结构和成分上也有着相应的差别。例如，由分生组织细胞分裂形成的幼嫩细胞，其细胞壁只有薄薄的一层胞间层，随着细胞的生长和成熟，逐渐形成了由原生质体分泌而成的初生壁。

细胞最重要也是最主要的组成部分是细胞核，它是由核膜、染色质、核仁、核液等几部分组成。细胞核不只是细胞的控制中心，在细胞

的代谢、生长以及分化中都起着重要的作用，而且还含有遗传物质，更是整个植物细胞的生命中枢。之所以这样讲，是因为细胞核中含有染色质，也就是我们平时所说的“染色体”。脱氧核糖核酸——也就是DNA——是染色质的主要成分，而DNA的碱基排列顺序中储存着细胞的遗传信息。通常，这里面的信息决定了植物下一代的发展特征。因此，细胞核可以说是细胞中最重要的物质。

细胞的组成部分还有线粒体。线粒体是一种双膜围绕而成的细胞器，它是植物进行呼吸作用的场所。线粒体的功能就好比一个能量供应站，可以通过呼吸作用，将糖转化成二氧化碳和水，同时又将能量以ATP的形式释放出去。释放出的能量是一种高能物质，细胞中的很多合成反应都需要消耗大量的ATP。

高尔基体由扁囊和小泡组成，它与细胞的分泌活动有着非常密切的关系，并且在细胞壁的形成中发挥着重要作用。

藻类和植物中含有的叶绿素被称为叶绿体，叶绿体是植物进行光合作用的场所，也是植物的重要细胞器之一。太阳能（光能）被认为是各种生命活动所需要的能量，通过光合作用被转化为化学能。由于光合作用能借助光能、二氧化碳和水合成含有能量的有机物，同时释放出氧气，因此绿色植物的光合作用是地球上有机体生存、繁殖和发展的根本保障和源泉。

叶绿素、胡萝卜素和叶黄素是叶绿体的主要成分，其中叶绿素的含量最多，遮住了其他色素，所以我们看到的植物一般都呈现绿色。此外，叶绿体由叶绿体外被、类囊体和基质三部分组成。叶绿体的内部含有外膜、内膜和类囊体膜三种不同的膜，以及膜间隙、基质和类囊体腔三种彼此分开的腔。类囊体是叶绿体的主要组成部分，所有的光能转化都是在类囊体的膜上进行的。许多类囊体像圆盘一样叠加在一起形成基粒，基粒是光合作用暗反应进行的场所。

内质网是植物细胞内膜系统所构成的一个连续的管道系统，这个管道系统有两种类型：一类是粗糙的内质网，另一类是光滑的内质网；前者因为具有核糖体而参与所有蛋白质的合成和加工，后者则因为没有核糖体而只参与合成脂类。

液泡是植物细胞中的泡状结构，是植物所独有的结构。液泡通常存在于成熟的植物细胞中，它们会随着细胞的生长而渐渐长大，然后相互合并，最后在细胞中央形成一个巨大的液泡，这个中央液泡可占据细胞体积的90%以上。当中央液泡形成之后，细胞质就会和细胞核挤到一起，成为紧紧贴着细胞壁的一个薄层。是否拥有一个中央大液泡是成熟植物细胞的显著特点，也是植物细胞和动物细胞在结构上的显著区别之一。

液泡的表面被一层薄薄的膜包裹着，即液泡膜，里面充满着细胞液。细胞液是一种含有多种有机物和无机物的复杂水溶液，如无机盐、生物碱、糖类、蛋白质、有机酸和各种色素等物质，甚至还含有有毒化合物。细胞液总是处于高渗状态，因此细胞看起来总是处于饱满状态。而液泡膜具有特别的选择透过性，因为膜的上面有一些小的气孔，可以让一些微小物质穿过，使许多物质聚集在液泡中，从而使不同的植物产生不同的味道，比如甘蔗的茎和甜菜的根中，就由于含有大量蔗糖而带有浓浓的甜味。也有些果实，由于含有丰富的有机酸而具有强烈的酸味。

正是由于细胞液中富含多种物质，因此细胞液保持着很高的浓度，这与细胞的渗透压以及水分的吸收都有着密不可分的关系，液泡和植物细胞的水分代谢也因此有着紧密的联系。简而言之，当植物吸收水分之后，液泡保持膨胀状态，这个时候植物的叶子会舒展开；当植物缺少水分时，液泡会缩小，植物的叶子也就蔫掉了。

第二节 植物的组织和器官

细胞分化成组织是由于植物需要拥有不同的生理功能。对一种植物而言，它的细胞分化程度越高，结构就越复杂，对环境的适应能力也就越强。例如被子植物，就是由于它的分化程度很高，因此形成的组织结构也就相对完善，所以无论是数量上，还是分布上，它都比其他植物占有更大的优势。

按照不同的组织功能和结构，我们可以把组织分为分生组织、基本组织、保护组织、疏导组织、机械组织以及分泌组织等六种。后五种组织是分生组织在形成器官时分裂形成的，因此我们又将这五种组织称为成熟组织。这些组织的功能各不相同，各司其职，发挥着不同的作用，并且相互配合，共同促进植物的生长。

细胞分化之后，能够形成许多结构不同、功能不同、形态也不相同的细胞群，而结构和功能相同、形态相似的细胞群就形成了组织。生物体中这些功能和作用不同的组织，依照一定的顺序排列起来，就能形成具有一定功能的结构，这种结构就是器官。某些器官进一步按照相应的顺序连接起来，共同完成一项或几项生理活动，就形成了各种不同的系统。大多数动植物的系统都是这样形成的，因此动植物体内的各个部分都是紧密联系的。

与生物体的组织相比，生物体的器官更高级，并且更加复杂，它们具有一定的功能，承担着生物体的某些工作。动物器官的种类复杂繁多，而植物器官就相对简单一些。植物中最高级最典型的一类是被子植物，被子植物拥有根、茎、叶、花、果实和种子六种器官。其他植物并不会像被子植物这样拥有齐全的六大器官，如裸子植物，它们只有根、茎、叶和种子四种器官；蕨类植物只有根、茎、叶三种器官；而苔藓植物仅有茎和叶，却没有根。至于大部分藻类植物，则连分化的器官都没有，甚至有些单细胞藻类的组成就只有单个的细胞，连组织都没有。

第二章 光合作用和蒸腾作用

通过光合作用将光能转化为化学能，是植物与动物的最大区别。借助于光合作用，植物不仅可以提供自身所需要的各种养分，还能为地球上的人类和动物提供维持生存的氧气和食物。对植物而言，它们吸收的水分有一小部分会被蒸发掉，大部分则用于蒸腾作用。

第一节 光合作用

光合作用是指绿色植物通过叶绿体，利用光能，把二氧化碳和水转化成储存能量的有机物，同时放出氧气的过程。植物细胞中的叶绿体因此也被当作是阳光传递生命的媒介，我们吸入肺中的氧气，都是植物进行光合作用时释放出来的；我们食用的食物，也都是直接或间接地由植物的光合作用制造的有机物。

人们在早期曾认为，我们从植物中摄取的营养都是植物从土壤中获得的，直到1773年，英国科学家普利斯特利（Priestley）做了一个实验，才让人们对植物有了进一步的认识。普利斯特利的实验是这样的：先将一只小白鼠和一支燃烧的蜡烛，分别放进一个密封的玻璃罩里面，小白鼠很快就死了，而蜡烛也在玻璃罩里熄灭。接着，普利斯特利又将一盆植物和一只小白鼠放入一个密封的玻璃罩中，将一盆植物和一支点燃的蜡烛放进另一个密封的玻璃罩中。这时，他发现植物能够长时间保持存活状态，蜡烛没有马上熄灭，而小白鼠也安然无恙。于是他认为，植物能够净化由于蜡烛燃烧或动物呼吸而变得污浊的空气。普利斯特利的这个实验改变了人们对植物的看法，也推进了人类对植物更加认真的研究，从此以后，人们对于植物的了解越来越深刻。

植物没有消化系统，这也是植物与动物的最大区别，因此它们必须依靠其他方式摄取生长所需要的养分。植物需要在阳光充足的白日里，

借助于阳光的能量进行光合作用，从而获得自身生长必需的养分。在这个过程中，植物细胞内的叶绿体发挥着关键的作用：叶绿体在阳光的照射下，将由气孔进入叶子内部的二氧化碳和由根部吸收的水分转化为葡萄糖，这一过程不仅能够为植物自身的生长提供养分，同时还会释放出动物和人类呼吸所需要的氧气。

光合作用能够为人类和动物的生存提供最基本的物质来源和能量来源，因此光合作用对于人类和生物界来说，都具有至关重要的意义。

光合作用的重要意义大致可以概括为以下四点：

第一，通过光合作用，植物能够制造出大量有机物。据科学统计，绿色植物每年可以制造4000亿至5000亿吨的有机物，这高出了地球上每年的化工产品总量。所以，人们把绿色植物比喻为“绿色工厂”。

第二，通过光合作用，植物可以转化并储存太阳能。植物将太阳能转化为化学能，并储存在光合作用制造出来的有机物中。地球上几乎所有的生物，其进行生命活动所需要的能量，都是直接或者间接来自于绿色植物制造的能量。

第三，通过光合作用，植物能够让空气中的二氧化碳和氧气的含量相对稳定。我们知道，所有生物都是依靠呼吸氧气生存的。据统计，地球上所有生物每秒就要消耗大约1万吨氧气，按照这样的消耗速度，空气中的氧气大约2000年就会用完；一旦氧气耗尽，也就意味着地球上的生物会随之消失。植物的光合作用避免了这种情况的发生，通过光合作用，绿色植物在消耗二氧化碳的同时释放出氧气，因此保证了大气中氧气和二氧化碳的含量维持在相对稳定的状态。

第四，植物的光合作用对于生物的进化具有重要的作用。我们知道，地球在形成之初是没有生命的，因为那时绿色植物还没有出现，地球的大气中也就没有氧气。当绿色植物在地球上出现并渐渐占据优势之后，大气中才慢慢有了氧气，那些必须通过有氧呼吸生存的生物才在地球上逐渐发展起来。

第二节 蒸腾作用

蒸腾作用是指水分（主要是叶子的水分）从植物体表面，通过水蒸气的形式散发到大气中的过程。这个蒸腾过程与我们在物理学上学习的蒸发作用不同，因为蒸腾作用不仅会受到外界环境的影响，还会受到植物本身的调节和控制，所以植物的蒸腾作用是一种比物理学上的蒸发作用复杂得多的生理过程。蒸腾作用的发生无关植物的大小，即使再幼小的植物也能进行蒸腾作用。

叶片是植物进行蒸腾作用的主要部位，蒸腾作用通过两种方式进行：一种是通过叶片角质层进行，叫作角质蒸腾；另一种则是通过叶片气孔进行，叫作气孔蒸腾。水分对于植物的生长极其宝贵和重要，如果丧失水分，植物将会受到严重的伤害。因此，为了降低蒸腾作用对植物造成的不利影响，植物在叶片表面进化出一层角质层，这个角质层正好能够有效地阻止植物的水分流失。除此之外，植物叶片上还有结构精致的气孔，这样也能最大限度减少水分的流失，所以气孔蒸腾也是蒸腾作用的主要方式。

如果说植物的光合作用是为地球上的所有生物造福，那么植物的蒸腾作用则完全是为自身服务。因此我们可以认为，蒸腾作用是植物吸收水分和运输水分的主要动力，它能够形成压降，促进植物将底部的水分向植物的上部运送，换言之，如果没有蒸腾作用，植物顶端的茎叶就吸收不到水分，整棵植物自然也不能正常生长。此外，蒸腾作用还能降低植物体表面和叶片表面的温度，增加叶片周围的湿度，这样就能够有效防止有害强光灼伤叶片。同时，蒸腾作用还能够令周围的空气变得湿润，尤其炎热的夏天是植物进行蒸腾作用最强烈的时间。此外，蒸腾作用也能够引发液流上升，有助于将矿物质和根部深层的有机物运送到植物顶端。蒸腾作用还能打开植物叶片的气孔，让植物更好地进行呼吸作用和光合作用。但是，蒸腾作用对于植物的水分会有较大影响，比如一株玉米从小到需要消耗200至300千克的水，但它本身能够吸收的水分只有1%，剩余的99%都被蒸腾了。因此，在湿度条件较高的地方，植物生长往往比较茂盛，这也是热带湿度高的地方会有大片树林的原因。

第三章 藻类植物

藻类是最低等的植物之一，属于单细胞植物，一个细胞担负着所有的工作。虽然藻类种类繁多，但它们并非一个独立的自然类型，而是一个非常大的集群。这类植物拥有共同特征，它们体内的叶绿素能够进行光合作用，所以人们将它们称为藻类。藻类植物都是自养植物，整个生物体中的所有细胞都会参与生殖作用。

第一节 蓝藻门和红藻门

蓝藻门还有个别名叫蓝绿藻门，它虽然是藻类植物中最简单、最低级的一门，但却是历史上最古老的植物。早在30多亿年前，蓝藻门就已出现在地球上。它的出现增加了地球上的氧气，也为其他生物的出现创造了条件，奠定了基础。

大部分蓝藻门类植物都生长在富含有机物的淡水中，另外小部分分布在湿土、岩石、树干和海洋中，也有一些与真菌一起形成地衣，还有一些生长在植物体内形成内生植物，甚至有少数种类还能生长在温泉内或终年被积雪覆盖的极地。蓝藻门植物的细胞壁缺乏纤维素，也没有真正的细胞核，细胞中央虽然含有构成细胞核的染色质，但却没有核膜和核仁。在蓝藻门类植物的细胞内，除了含有叶绿素和胡萝卜素外，还含有藻蓝素，还有一些蓝藻门植物含有藻红素。不过，与其他植物不同的是，蓝藻门植物的色素并不是被细胞质包围着的，而是分布在细胞质的周围。蓝藻门的繁殖方式是分裂生殖，而不是有性生殖。

蓝藻门的一些种类被广泛应用到生活中，如项圈藻、念珠藻、简孢藻等藻类具有固氮的作用，能够使土壤更加肥沃，葛仙米、发菜、海雹菜等藻类可以食用。但是，有些蓝藻门植物如果生长过多，便会给人类造成危害，比如微胞藻、项圈藻等，如果在夏季生长速度过快，量过

多，就会降低水中的含氧量，而且这些藻类在死后会分解产生毒素，导致鱼虾等生物生病，甚至死亡。

红藻是藻类植物中的另一个种类，大部分是多细胞植物，体长从几厘米到十几厘米不等。红藻的颜色并不是纯正的红色，通常是紫红色，也有褐色、绿色、粉色、黑色等多种，颜色不一。这是因为红藻除了含有叶绿素和胡萝卜素外，还含有藻胆素（藻红素和藻蓝素）。红藻所储藏的养分，通常是一种特殊的非溶性多糖类，这种糖类叫作红藻淀粉。另外，一些红藻的体内还含有硝盐，尤其是在一些红藻比较老的部位，硝盐的含量更高。红藻的繁殖方式是产生孢子和卵配生殖，但没有鞭毛。它们是有性生殖，过程十分复杂，雌性生殖器被称为果胞，精子在果胞前端延伸出的一个长长的受精丝上完成受精。由于红藻门对生长环境的要求不高，适应能力很强，因此分布范围很广，即便在营养浓度低、光照强度弱甚至温度非常低的地方也能存活。它们不仅能够在溪流、江河、湖泊和海洋中生存，还能够在潮湿的地方生长，从炎热的热带到寒冷的两极，从积雪皑皑的高山到潺潺流动的温泉，从潮湿的地面表层到比较深的土壤中，几乎都有红藻的生长痕迹。

第二节 甲藻门、紫菜和轮藻门

甲藻门植物属于单细胞植物，这类植物的细胞壁大多含有纤维素，而且非常厚，看起来与古代战士穿的铠甲相似，因此被称为“甲藻”。但并非所有甲藻类都有细胞壁，没有细胞壁的甲藻类植物被称为“裸甲藻”。还有一些甲藻门植物，其细胞内含有特殊的甲藻液泡和刺丝胞。甲藻门植物属于杂色藻类，它的色素体不仅含有叶绿素和胡萝卜素，还含有几种叶黄素，如硅甲黄素、甲藻黄素、新甲藻黄素等，大部分细胞呈棕黄色或者黄绿色，也有一些呈粉红色或者蓝色。淀粉、脂肪等物质是甲藻门储存的主要养分。大部分甲藻门都有长短不同的两条鞭毛，常由许多小甲板按一定形式排列而成，但也有一些种类不具有小甲板。甲藻门的生存方式主要是腐生和寄生两种，繁殖方式多是细胞分裂或者产生游移的孢子，也有些是有性生殖，为同配或者异配，但这一类非常少见。

紫菜是我们日常生活中常常见到的藻类，作为一种食物，紫菜不仅味道鲜美，所含的蛋白质也高达29%至35%，还含有人体所需的碘、多种维生素以及无机盐等物质，能够预防因缺碘而引起的甲状腺肿大，还能够降低胆固醇，因此被广泛食用。尽管紫菜与其他海藻相比种类比较少（现在仅发现了70多种），但它的分布范围非常广，地球上大部分地方都可以看到它的身影，不过紫菜主要分布的地区还是集中在中纬度温带地区。因为人们对紫菜的需求量很大，自然生长的数量跟不上，所以现在人食用的紫菜，主要还是由人工养殖。

紫菜的外形不复杂，由圆盘状的固着器、叶柄和叶片三个部分组成。其中，圆盘状的固着器把植物体固定在基质上；叶柄是紫菜叶片和固着器之间的过渡带；叶片是由几层细胞构成的膜状体，它们的体长由于种类的不同而有所不同，有的种类只有几厘米，而有的种类长达好几米。种类不同的紫菜有着不同的颜色，有紫红色、蓝绿色、棕红色、棕绿色等多种颜色，以紫色最为常见，紫菜也因此得名。之所以有这么多颜色，是因为紫菜中不仅含有叶绿素、胡萝卜素、叶黄素，还含有藻红蛋白、藻蓝蛋白等色素，当这些色素含量的比例不等时，紫菜就呈现出各种各样的颜色。

地球上的轮藻门植物仅有300多种，它们与其他藻类不同，主要生长在淡水环境中，如稻田、沼泽、池塘、湖泊等地。水质方面，轮藻门更喜欢生长在钙质丰富的硬水以及透明度较高的水体中，也有少数种类生长在半咸水中。轮藻门无论是在细胞结构，还是通过光合作用储存营养的方式方面，都与绿藻门非常相似，只是轮藻门的藻体更大，而且是直立状态。轮藻门的生长方式和大多数高等植物类似，它的中轴部分，也就是茎部，在生长过程中逐渐分化为节与节间，然后在每个节上生长出小枝和侧枝。尽管看上去似乎有些复杂，但依然改变不了轮藻门是单核细胞这一事实。植物轮藻门的生殖方式主要有两种：其一是有性生殖，其二是营养生殖，不过它的生殖器官比其他藻类的生殖器官更加发达，具有藏精器和藏卵器的功能，都生长在小枝上，因此当精子和卵子结合在一起合成合子后，就发育成新的个体。当然，假如轮藻门的藻体被折断，在它折断的部位就会生长出“假根”，然后慢慢地长成新的植物体。

第三节 绿藻门

绿藻门是藻类植物中的一个大类，数量和种类都很多，目前已经发现的就有一万多种。绿藻植物的外表一般来说都是草绿色的，内部结构有单细胞、群体细胞和多细胞之分，外形上则多呈丝状、片状和管状。绿藻门植物的细胞壁主要是纤维素，分为两层，内层主要由纤维素组成，外层主要是果胶质，而且呈黏液状态。它的细胞内部含有真正的细胞核，包含着核膜和核仁。绿藻门色素体的形状、数目视种类的不同而各异，所含色素成分与高等植物相似。

绿藻细胞中含有叶绿体，形状多种多样，多呈杯状、环带状、螺旋状和星状、网状等。绿藻的叶绿体中含有与高等植物细胞内含有的相同的光合色素，不过绿藻进行光合作用的产物是淀粉，主要储存在蛋白核的周围。由于绿藻的这些特征与高等植物相似，所以也有植物学家认为绿藻门类植物是高等植物的起源。绿藻门植物的繁殖方式有三种，分别是细胞分裂、形成各种类型的游动和不动孢子以及有性生殖。同时，绿藻门植物的形态差异非常大，并且进化程度各不相同，从单细胞到多细胞，从简单植物到复杂植物，几乎包含了藻类进化历程的每一个阶段。

刚毛藻、团藻和鞘毛等科都是绿藻门植物的种类，刚毛藻既可以生长在海洋里，也可以生长在淡水中。刚毛藻的细胞壁非常厚，而且具有很强的韧性，所以它们是很好的造纸原料。除此之外，它的细胞中含有大量纤维素，因此能够制造各种纤维素食品。刚毛藻是分枝的丝状体，在年幼时会生出固着器，也就是假根；但等到年老后，它会与基质脱离，成为漂浮自由的个体。

团藻是介于动物和植物之间的生物，在动物界中属于原生动物门，在植物界中则属于绿藻门团藻目团藻属。团藻的细胞数目众多，有时可高达上万个，它们大多生长在富含有机质的淡水中。就像动物界的某些昆虫一样，团藻的细胞是有分工的，由于大部分团藻细胞都失去了生殖功能，因此一些细胞专门担负起了生殖工作，团藻中若是出现两代、三代甚至五代同堂的情况，也是很常见的。此外，团藻是集群植物，每个

团藻由1000至50000个衣藻形细胞呈单层在球体表面排列。团藻的藻体呈球形，直径约5毫米，外面包裹着一层薄薄的胶质层。团藻还有吸收放射性物质的能力，所以可以用来净化水质。

鞘毛藻科在绿藻门中属于淡水绿藻，我们可以在许多淡水中看到它的踪影。鞘毛藻是一种丝状体，由单列细胞构成。一些种类的丝状体形成了二分叉的分枝，并分化为匍匐和直立的两部分；也有一些都是匍匐状的，但丝状体之间表现出分离状态，或者紧密地排列在侧部，构成了圆盘状或者假薄壁组织状的植物体。不过，所有种类都是从细胞内部长出来的一根细长的刚毛，刚毛的基部是鞘，“鞘毛藻”这个名字也由此而来。鞘毛藻的生殖方式是有性生殖中的卵式生殖。

第四节 褐藻门

褐藻门植物的进化程度是藻类植物中比较高的，它的细胞内含有叶绿素、胡萝卜素、墨角藻黄素、叶黄素等物质。藻体颜色因所含色素的比例不同，而呈现出不同的颜色，以黄褐色或者深褐色为主。褐藻门植物储存的养分主要是海带多糖（又叫褐藻淀粉）和甘露醇，这两种物质经常被用作工业原料，其中，褐藻胶在纺织、造纸、橡胶、医药、食品等各个方面都有着广泛的用途。

褐藻门的植物体外形多样，如丝状、叶状、树枝状等，大小也有着很大的差别，长度从仅几百微米到长达几十米不等。尽管它们长短不同，但都是多细胞，不存在单细胞或群体。褐藻门植物的繁殖方式主要为营养繁殖、无性生殖和有性生殖三种。

褐藻门植物最常见的是裙带菜和海带。

裙带菜是我们在日常生活中常常见到的，它属于温带性海藻，能够承受比较高的温度，是一种经济海藻。由于形状类似于古代女子的裙带而得名“裙带菜”。裙带菜的孢子体呈黄褐色，由固着器、叶柄和叶片三个部分组成，这样的结构与海带相似，而且它的生活史也与海带的生活史相似，同样是世代交替，只是海带孢子体的生长时间更长一些。裙带

菜中含有多种营养成分，除了含有人体所必需的矿物质外，还含有蛋白质、脂肪、糖类和多种维生素等物质，而且它的蛋白质含量要远远高于海带。此外，还能从裙带菜中提取核藻酸。

海带是核藻体植物中个体比较大、营养价值比较高，并且在生活中有着广泛应用的一个种类。海带表面光滑，自然环境中生长的海带长度是2至3米，而人工养殖的能够长到5至8米。海带的藻体呈褐色，形状为长带状，由固着器、柄部和叶片三个部分组成，其固着器呈假根状，柄部粗短，是圆柱形的，上部比下部宽大，连接着长带状的叶片（日常生活中所食用的部分），叶片中央有两条相互平行的浅沟，中间是中带部，厚2至5毫米，中带部的两端比较薄，而且带有褶皱。海带的营养价值和食用价值都非常高，从中提取出来的碘和褐藻酸被广泛应用于医药、食品、化工等多个方面。海带的含碘量非常高，碘是人体必需的元素之一，尽管所占比例很小，但起着重要作用。人体如果缺乏碘元素，会出现甲状腺肿大，只要多吃一些海带就能预防这种疾病的发生。同时，海带还有预防动脉硬化、降低人体中胆固醇和脂肪含量的功效。

第四章 苔藓植物

苔藓植物是自养型绿色陆生植物，从进化的观点来看，苔藓植物起源于绿藻，是小型多细胞的绿色植物，大部分都喜欢阴暗潮湿的环境，生长在裸露的石壁上或潮湿的森林、沼泽等地方。苔藓植物的植物体比较简单，属于配子体，是孢子发展成原丝体，然后由原丝体逐渐发育而成的。

第一节 苔藓植物的结构和生殖

苔藓植物的个体通常较小，只有假根，叶片也只由一层细胞组成。苔藓植物通过光合作用，吸收自身生长所需的水分和养分。地球上已知的苔藓植物种类大约是23000种。

根据营养体的形态结构，我们把苔藓植物分为两大类：一类是苔类，这种植物保留了叶状体形态；另一类是癣类，这类植物已经开始有类似的茎和叶分化出来。也有人将苔藓植物划分为苔纲、角苔纲和藓纲等三个纲。苔藓植物的分布范围十分广泛，除了生长在热带和温带外，还能够生长在南极洲和格陵兰岛。就植物分化的角度而言，苔比藓更为原始，也更加简单。人们习惯上将成片的苔藓植物称为苔原，大部分苔原分布在欧亚大陆北部和北美洲，也有小部分分布在高山地区。

苔藓植物的雌性生殖器被称为颈卵器，形状看起来和实验室中的烧瓶有点像，颈部狭长底部膨胀，外壁包裹着一层营养细胞。苔藓植物的雄性生殖器被称为精子器，形状多数呈球形或者棒状，外壁同样包裹着一层细胞。因为苔藓植物的生殖离不开水，所以精子器中的精子需要在有水的条件下才能到达颈卵器与卵细胞结合在一起，形成受精卵并孕育出下一代。苔藓植物的繁殖方式有三种：无性生殖、有性生殖和营养生殖。无性生殖的方式是产生大量的孢子；有性生殖是卵式生殖，即依靠

精子和卵子的结合生殖；营养生殖的方式则是形成营养体，也就是配子体的断裂和新生，即孢子在合适的环境中发育出新的植物。

尽管苔藓植物是微不足道甚至会被忽略的植物，但它对于自然界来说却有着至关重要的作用。首先，苔藓植物吸水性超强，在防止水土流失方面有很好的效果；其次，苔藓植物的叶片是单层细胞结构，能轻易将空气中的污染物吸收，起到净化空气的作用，同时由于它对空气中的污染物很敏感，故而也可以作为空气污染的指示物；第三，晒干以后的苔藓植物可以作为肥料或者燃料使用，比如泥炭藓就是一种营养很丰富的肥料。除此之外，苔藓植物可以加强沙土的吸水性；很多苔藓植物被晒干之后能直接作为燃料使用，还能够用于发电。比较特别的一点是，虽然苔藓植物是最低等的植物，却被一些鸟雀和哺乳动物当作美味食物。当然，苔藓植物还有助于形成土壤，因为它们可以聚集周围的水分和浮尘，分泌酸性物质，使岩石的腐蚀速度加快，以促进岩石的分解，这样就能让岩石逐渐变成土壤。有些苔藓植物还是天然的药材，如某些泥炭藓具有清热消肿的作用，而泥炭酚能够治疗皮肤病，被作为草药应用到治疗中。与其他植物一样，苔藓植物也能够通过光合作用向外释放氧气，为生物的呼吸作用提供原料。

第二节 地钱、葫芦藓和金鱼藻

地钱是苔藓植物中的苔类植物，分布范围广泛，世界上几乎每个角落都能看到它的影子。地钱的植物体呈扁平状，体积不大，宽度只有约1厘米，长度约10厘米，主要为淡绿色或者深绿色，有着波浪状的叶片边缘。地钱主要生长在阴凉潮湿的地方，在草丛中、小溪边的碎石中或水稻田埂、房屋附近都能发现它。营养生殖是地钱的主要生殖方式，它的植物体成熟之后，会在叶状体的表面长出类似于酒杯的结构，即孢芽杯。孢芽杯是一个圆形的薄片，当其中的水分比较多时，里面的孢芽就会落到地面上，在适应的生长条件下就会发育成一个新的地钱。地钱具有清热解毒的功效，也可以入药。

葫芦藓是一种常见的苔藓植物，植株矮小，每株高度只有2至3厘

米。葫芦藓与其他藓类一样，也喜欢潮湿阴暗的环境，通常生长在庭院、田园的路边以及山地燃烧之后的炙土等富含有机质的土壤中。葫芦藓呈鲜绿色，有些稠密成片地生长在阴暗的角落中，也有些比较稀疏。葫芦藓的“叶片”生长在茎的中上部，呈稀稀疏疏的莲座状。叶片上有一条中肋，这条中肋之外的其他部分都由单层细胞组成。葫芦藓是雌雄同体植物，呈花蕾状的雄器生长在苞顶上；雄器苞下面的侧枝上是雌器苞；当雄枝逐渐萎缩时，侧枝便会慢慢变长，长成主枝。葫芦藓有着红褐色的蒴柄，长度4至5厘米，蒴柄的前端呈弧形，葫芦癣干燥之后，这个形状会发生变化。

金鱼藻又有细草、鱼草、软草、松藻等别名，种类极少，全世界也仅有上百种。金鱼藻的植物体呈深绿色，有又细又滑的茎，高度在20到40厘米不等，生长着一些稀稀疏疏的短枝。叶片为轮生，没有叶柄，长度约为1厘米，通常情况下是一回二叉状分枝，有时也会出现二回二叉状分枝。前端是两根短短的尖刺，边缘有小刺。金鱼藻的花非常小，而且是单性的，生长在节部叶腋，数量一般为1到3朵，花梗很短。金鱼藻通常生长在淡水池塘、水沟、小河、温泉、水库等地方，常被用来制作喂养家禽的饲料，分布范围十分广泛，主要分布在中国、蒙古、朝鲜、日本、马来西亚、印度尼西亚、俄罗斯等国家，以及欧洲、北非、北美等地。

第三节 真菌类植物

真菌是一种陆生真核生物，如蘑菇、酵母菌等，它常常是多细胞生物，有细微的菌丝，用来吸取其他生物制造的化合物。多数真菌可以分解动植物的残骸，作为自身生长所需的养分，并使其进入再循环系统。真菌是具有真核和细胞壁的异养生物，种属繁多，超过十万多个。其中，众多真菌的营养体是由纤细管状菌丝形成的菌丝体，大部分真菌的细胞壁中含有的甲壳质是它最显著的特征，再有就是纤维素。常见的真菌含有的细胞器有细胞核、线粒体、微体、核糖体、液泡、溶酶体、泡囊、内质网、微管及鞭毛等。

真菌主要分为酵母菌、霉菌和大型真菌三个类别，大型真菌是指能够形成肉质或者胶质的子实体或者菌核，常见的有香菇、草菇、金针菇、双孢蘑菇、平菇、木耳、银耳、竹荪和羊肚菌等，它们既是具有代表性的重要菌类蔬菜，又是食品业和制药业的重要资源。

多数真菌都是腐生生物，以死亡或者正在分解的有机物为主要食物；也有一些真菌，比如念珠菌，是以活的有机体为食；还有一些真菌，如地衣，与其他生物是共生关系。

真菌生长到一定时期后，便转入繁殖阶段，形成各种繁殖体，也就是子实体。真菌的繁殖体有无性繁殖形成无性孢子和有性生殖产生有性孢子两种。无性繁殖是指营养体不用经过核配和减速分裂就能产生后代的繁殖方式，其基本特征是：营养繁殖通常由菌丝形成无性孢子；有性生殖则是指真菌发育到一定时期（一般指后期）进行的繁殖，这种生殖是两个性细胞结合在一起后，细胞核产生减数分裂从而形成孢子的繁殖。多数真菌由菌丝分化后形成性器官（即配子囊），通过雌、雄配子囊结合在一起形成有性孢子，整个过程由质配、核配和减数分裂三个阶段构成。通过有性生殖，真菌能够形成四种有性孢子：卵孢子、结合孢子、子囊孢子和担孢子。另外，还有一些低等真菌，如根肿菌和壶菌，也会产生有性孢子，这是一种由游动配子结合形成合子，再由合子慢慢发育成有着厚厚细胞壁的休眠孢子。

第五章 蕨类植物

蕨类植物是指根、茎、叶等营养器官出现分化，并以孢子进行繁殖，在植物体内进化出微管组织的陆生植物。这些器官的出现对于蕨类植物的生长而言有着非常重要的意义，同时让蕨类植物更容易适应地球的环境。尽管蕨类植物不是完全的陆生植物，但它是高等植物中比较原始的一大类群，也是最早的陆生植物，有着顽强而旺盛的生命力。

第一节 蕨类植物的特征和结构

蕨类植物是比藻类植物更高级的植物，因为它拥有根、茎、叶等营养器官，并以产生孢子的方式进行繁殖。最重要的一点是，蕨类植物的内部进化出了微管组织，它只比种子植物低一级，也被称为“羊齿植物”。

过去，我们习惯将蕨类植物作为一个单独门类，其下包含了五个纲目：松叶蕨纲、石松纲、水韭纲、木贼纲（即楔叶纲）、真蕨纲。蕨类植物分化出现的根、茎、叶等营养器官，为植物进化史增添了重要的价值。由于根的出现，植物体也因此更加稳定，并深入到土壤的深层以吸收更多的水分和矿物质；茎部一方面使植物体直立起来，另一方面，茎内部微管结构的形成，为植物体创建了比较完善的疏导系统，方便营养物质输送到植物体的各个部分，有利于植物的生长；叶片对于光合作用的进行起到了巨大作用，相比藻类植物，蕨类植物的叶片表面增大了许多，使植物体能够更多地吸收太阳光中的能量，得以更好地生长。但是，蕨类植物的受精作用依旧离不开水，因此，尽管它分化出了许多器官，但仍然不属于完全的陆生植物。此外，蕨类植物和苔藓植物一样，也存在明显的世代交替现象。

蕨类植物的生殖方式主要有两种，一是直接产生孢子的无性生殖，

另一种是有性生殖，其生殖器官是精子器和颈卵器。由于蕨类植物分化出了根、茎、叶等营养器官，内部还出现了维管组织，因此远比配子体发达，这也是蕨类植物区别于苔藓植物的最显著特征。不过，尽管蕨类植物能够形成高等孢子，却无法形成种子，而且它的孢子体和配子体都能独立存活，这就是蕨类植物与种子植物的不同之处。

地球上目前已知的蕨类植物大约有12000种，其中大部分是草本植物。蕨类植物与许多植物一样，适合在潮湿温暖的环境中生长，不过多为土生、石生或者附生，少数是水生或者亚水生。蕨类植物广泛分布于除了海洋和沙漠之外的平原、森林、草地、岩缝、溪沟以及沼泽、高山、水域等地方，但主要还是分布在热带和亚热带地区。蕨类植物的叶片尽管十分复杂，但类型上只有两类：小型叶和大型叶。小型叶是单叶，叶片很小，几乎看不见叶柄，叶片内也没有叶隙，只有单一的一枝叶脉，如石松纲类植物。大型叶顾名思义是指叶子较大，叶片中含有叶柄，叶内有叶隙，同时维管束大部分有分枝。除了石松和卷柏之外的蕨类植物，基本都是大型叶。不过，也有一些特殊蕨类植物，部分叶片完全着生于孢子囊群，人们将之称为孢子叶或可育叶；而另一部分不能生成孢子囊群的叶片，则被称为营养叶或者不育叶。蕨类植物的根一般都是不定根，为须根状；大多数是根状茎，匍匐生长，少部分长有地上茎，逐渐呈乔木状，如桫椤。蕨类植物的茎上常常长着鳞片或者毛茸，鳞片是膜质，上面布满了或粗或细的筛孔；毛茸也有许多种类，如单细胞毛、腺毛、结状毛、星状毛等。

蕨类植物的叶子非常漂亮，因此常被当作观赏植物栽种，如巢蕨、卷柏、桫椤和槲蕨等。此外，一些蕨类植物还被广泛应用到医药业，如杉蔓石松能祛风湿、舒筋活血；节节草能够治疗化脓性骨髓炎；乌蕨能够治疗菌痢、急性肠炎等。蕨类植物对生长环境非常敏感，不同的属类或种类对于生态环境条件的要求也各不相同，因此它也是地质学家寻找矿物的明显标志，如石蕨、肿足蕨、粉背蕨、石韦、瓦韦等植物，生长在石灰岩或者钙含量丰富的土壤中；鳞毛蕨、复叶耳蕨、线蕨等植物，则生长在酸性土壤中；还有一些种类适宜生长在中性土壤或者碱性土壤中。

第二节 桫椤和铁线蕨

最常见的蕨类植物多是草本植物，但也有一些长得像树的，被称为树蕨，桫椤就是其中的代表。桫椤一般生长在湿度大、温度高的树林中或者凉阴地上，主要分布在热带和亚热带地区。在1.8亿万年前的地球中生代，如果说动物界的霸主是恐龙，那植物界的霸主就是桫椤。它们的足迹在那个世代遍布全球，同属“爬行动物”的时代标志。

由于种子植物的出现，树蕨开始逐渐衰落，到现在仅仅剩下少数珍贵的种类，而桫椤就是其中之一。桫椤的存在对于研究古植物学、植物系统学有着重大意义。桫椤株高在1至6米之间，胸径的长度是10至20厘米，树干上有残留的叶柄，上面覆盖着暗褐色的鳞片和鳞毛。桫椤茎直而没有分枝，茎的顶端有数枚巨大的叶子，它们是三回羽状复叶，长1至2米，宽约0.5米，远远望去，桫椤就好像一把巨大的绿伞。

铁线蕨也被称为铁丝草、铁线草，多年生草本植物，高度为20至45厘米，在温暖湿润、半阴暗的环境中生长，主要分布在温带、亚热带、热带的某些地区。铁线蕨根状茎呈黄褐色，横向生长，覆盖着条形或者披针形的淡褐色鳞片，上面长着质地较薄的叶，叶柄细弱，呈紫黑色，并有一定光泽，看起来很像铁线，因而得名“铁线蕨”。铁线蕨的根茎中部以下是二回羽状复叶，羽片呈互生关系，小羽片呈斜扇形，边缘从浅裂一直到深裂，基本呈阔楔形。

铁线蕨株形很小，形态优美，又容易培育，因此是蕨类植物中被栽培最普遍的种类之一，出现在许多花园和植物园中。

第三节 鳞木和鹿角蕨

鳞木是已经灭绝的鳞木目中最具代表性的植物，它是石炭纪时期常见的大型蕨类植物，呈乔木状。鳞木在二叠纪时期慢慢消失，灭绝之后被埋在深深的地下，经过数亿年的时间演变为煤炭。

现代人多是通过对化石的研究来了解鳞木。通过分析得知，鳞木是

高大的木本植物，主干粗，树皮厚，高度在30至50米不等，茎部的直径大约是2米，二叉分枝形成树冠，叶子呈针形，螺旋状排列；老树叶凋落之后，茎枝的表面会留下菱形或纺锤形的叶基，这也是“鳞木”这个名字的由来。鳞木树茎内部有维管层和木栓层，茎干基部的器官与根相似，所以被称为根座，根座也是二叉分枝，根自根座四周长出。鳞木属的孢子叶聚集形成孢子叶球，位于小枝的顶端。每个孢子叶的表面都长着一个孢子囊，孢子囊分大小两种，小孢子囊中包含着许多小孢子，而大孢子囊中含有4、8或16个大孢子。

鹿角蕨在全球共有15种，主要分布在热带雨林，属于附生性多年生蕨类草本植物。鹿角蕨生长在阴湿的地方，有特别强的抗阴性，多数附生在高大树木的茎秆开裂处或分枝处，也能在浅薄的泥炭土、腐叶土或者潮湿的岩石上生存。鹿角蕨的根状茎肉质，横向生长的叶丛生、下垂，叶片分为两种类型，一种是能进行光合作用，可以制造植物生长所需养分的正常叶片，这种叶片的幼叶呈灰绿色，而成熟叶呈深绿色；另一种是不能进行光合作用，但可以帮助植物体吸收枯枝败叶、雨水、尘土等的腐殖叶，这种叶片在一些细菌和微生物的帮助下，可以将有机物分解成无机物，以便植物能够更好地吸收。鹿角蕨的植株形态奇特，姿态优美，是非常好的室内悬挂观叶植物，因此常常被作为观赏植物引种和栽培，还有人将它贴在枯木或者树干上，作为墙壁的装饰物。鹿角蕨也有一定的药用价值，被应用于制药业。人工种植鹿角蕨通常使用分株繁殖的方式，分株的最佳时间是每年的二三月份或者六七月份。分株时，首先从鹿角蕨的母体上选择长势比较好的植株，再用刀片顺着底部慢慢切开，最后移植到花盆中培育。

第六章 裸子植物

顾名思义，裸子植物是指种子裸露在外面的植物，与种子植物相比，它们要更低级一些，它们的种子由胚珠发育而成，胚珠裸露在外面，没有子房壁包被，因此被命名为裸子植物。

第一节 裸子植物的形态

裸子植物产生和发展的历史都十分悠久，若追溯的话，最早可追溯到古生代。在中生代和新生代时，它们已经广泛分布在世界的各个角落。不过，在地球环境大变迁时，大量的裸子植物由于无法适应而先后灭绝，到现在仅存留800余种。

裸子植物与蕨类植物之间存在着较大的差异，这种差异表明植物的进化又向前迈进了一大步，它们的不同之处主要有以下几方面：第一，裸子植物出现了种子这一新的繁殖器官。种子由胚、胚乳和种皮三个部分组成，胚来自受精卵，是新的孢子体；胚乳来自雌配子体；种皮则源于珠被，是老的孢子体，这是植物进化过程中一次非常重大的革命。第二，裸子植物出现了花粉管，这是裸子植物新出现的一种结构。当花粉粒落在胚囊上慢慢发育成雄配子体时，便开始生成花粉管，它通过颈卵器进入到卵附近，释放精子，与卵结合形成受精卵。这样一来，植物的受精作用就摆脱了对水的依赖，使它能更好地适应陆地环境。第三，裸子植物能够次生生长，次生结构的出现也是裸子植物能更好地生活在陆地环境中的原因，所以许多裸子植物都能够长成参天大树。

多数裸子植物都是重要的木材，广泛分布在北半球的温带和亚热带，这些地方的气候非常适宜裸子植物生存。

裸子植物在现实生活中有着广泛的用途，并且拥有极高的经济价值。世界上的大部分木材都是裸子植物长成，它们还是纤维、树脂等生

产原料的树种。我们会在下面向大家介绍一些具有代表性的裸子植物。

第二节 裸子植物的代表性植物

银杏树又被称为白果树，古人将之称为鸭脚树或者公孙树，它和雪松、南洋杉、金钱松并称为世界四大园林树木。银杏树是第四季冰川运动后遗留下来的最古老的裸子植物，而且是古代银杏类植物在地球上存活的唯一品种，也是世界上非常珍贵的植物之一，植物学家因此将其称为植物界的“活化石”。

四大园林树木中，银杏是最古老的树种，栽培历史最悠久，种植范围广泛。银杏是落叶乔木，躯干挺拔，树形优美，抗病害的能力强，寿命也非常长，有些银杏的寿命可达几千年。银杏以其挺拔的树干，优美的体态，小巧玲珑的叶片，很高的观赏价值以及巨大的经济价值备受全世界人们的瞩目。除此之外，银杏的适应能力很强，只要自然条件适合就能够很好地生长。银杏的药用价值也很高，尤其是它的果实（白果），味甘微苦，药食俱佳。果实经过加工后，可以制成香甜可口的饮料以及保健食品，并具有止咳润肺的功能。此外，银杏的根、茎、皮都含有多种药物成分，具备很高的临床应用价值。所以，银杏对于人类而言是“浑身上下都是宝”的植物。

苏铁是裸子植物中的另一个代表性植物，这是一种常绿乔木，是热带和亚热带南部广泛分布的树种，喜欢阳光充足、气候温暖、通风性好的环境，一般生长在土壤肥沃、略带酸性的沙质土壤中。不过，苏铁的抗寒力较差，因此生长速度缓慢。苏铁的树干挺拔，呈圆柱形，整棵树呈伞状，叶子是大型羽状复叶，丛生在躯干的顶端，由几十对甚至几百对小叶组成，小叶呈线形，刚长出时向内弯曲，成熟之后变得挺拔刚硬，长达2至3米，深绿色且有一定的光泽。

苏铁是雌雄异株的植物，雄球花的颜色为黄色，外表呈圆柱形；雌球花的外表是扁球形，上面长满了褐色的绒毛。苏铁的种子为棕红色，呈倒卵形，且有一点扁。一般来说，苏铁在六七月份开花，种子在十月

份成熟。苏铁种类繁多，目前已知的就有三科一属240余种。苏铁既有很高的经济价值，又因为其植株形状典雅、主干粗壮、叶片坚硬如铁、四季常青且有光泽，而深受人们的喜爱，是珍贵的观赏树种。除此之外，苏铁的种子（通常称为西米）含有大量淀粉，味道鲜美。苏铁的许多部位都可制作成药品，用于治疗多种疾病。

巨杉，顾名思义就是指非常大的杉树。巨杉原产于美国的加利福尼亚州，以其巨大的身躯闻名于世。尽管现在巨杉已经被推广到世界各地进行栽种，但生长在美国加利福尼亚州的巨杉依然是全世界最大的植物。有些巨杉的胸径超过10米，高度更能够达到100米，大约有30层楼那么高。巨杉喜欢阳光充足、温度适宜的环境，在这样的条件下，它的生长速度会非常快，尤其是在它生命的前500年，更是十分迅猛。巨杉的抗腐蚀性和耐火性都很强，因而常被用来制作铁道枕木以及电线杆等物品，具有巨大的经济价值。

侧柏和苏铁一样是常绿乔木，又称柏树、香柏，其树干上长着扁平的小枝，因此也被称为扁柏。侧柏的寿命长，但生长速度缓慢。侧柏的幼苗和幼树都有一定的耐阴性，成树较耐寒，但抗风性比较差；耐干旱，喜湿润，但不耐水淹；耐贫瘠，可以在微酸性到微碱性的环境中生长。侧柏的胸径大约是1米，高度在20至30米之间。侧柏的树皮呈浅灰色，而且较薄，纵裂成条片；木质软硬适中，纹理细腻，带着微微的香气，抗腐蚀的能力很强，是用来制作高档家具的好材料。侧柏的枝条向上稀稀疏疏地伸展，叶片呈鳞状，非常小，长度在1至3毫米，交互式对生。此外，侧柏的种子、叶子以及树皮可以制作成药材，种子还能榨油，用来制作肥皂，也可食用或药用。侧柏幼树的树冠看起来像是一座小尖塔，老树的树冠则又宽又圆。侧柏是雌雄同株的植物体，球果呈卵圆形，长度在1至2厘米间，在尚未成熟时果肉的颜色是蓝绿色，成熟之后就会变成鲜红褐色。侧柏经济价值也非常高。

红豆杉也被称为紫杉、赤柏松，还有个别名叫美丽红豆杉，属于常绿针叶，因秋季时会结出独特的樱桃般大小的红豆果而得名。红豆杉是第四纪冰川运动之后遗留下来的世界濒临灭绝的珍稀植物，自然分布范围较为狭小。红豆杉的叶子四季常青，即使冬天也不会落叶，所以它常常被作为绿化植物栽种在城市中。红豆杉比其他裸子植物的生长速度

慢，正因如此，它的材质非常坚硬，结构细致，坚韧耐用，纹理清晰，属于上等木材。又因为红豆杉含有抗癌特效成分紫杉醇，所以显得尤为珍贵。

油松同样是常绿乔木，高达25米，胸径也在1米左右。壮年时期的油松，树冠是塔形或者卵形，到老年时期，树冠呈现伞形。油松的树皮颜色为灰棕色，呈鳞片状，上面布满了裂缝，裂缝呈红褐色，上枝较粗壮，光滑无毛，多数呈褐黄色。油松是雌雄同株植物，雄球花的颜色是橙黄色，雌球花则是绿紫色。小球果呈卵形，顶端长着刺，4至9厘米长。没有柄或者柄很短，可以在枝上宿存好几年。油松的开花季大约在四五月份，果实在第二年的十月份成熟。油松喜欢阳光充足、气候干冷的环境，抗风性好，能够在土壤肥厚、排水性好、含钙量高的地方良好生长，分布也较为广泛。油松的中心为淡红褐色，边材为淡白色，纹理顺直，结构细密，材质坚硬，含有大量的树脂，抗腐蚀性和抗腐朽性都较强，绝对是上等木材。油松还可以采集松脂，能够在工业上发挥重要作用。油松的树干苍劲挺拔，四季常青，而且能够抵抗风霜严寒，因此也是非常好的园林绿化植物。

第七章 被子植物

被子植物是植物进化的最高级阶段，无论是器官还是系统，被子植物都是植物中进化得最完善的，它们在地球上占据了绝对优势。目前为人们所知的被子植物共有1万多属，20多万种，在所有植物界种类中占了一半。被子植物众多的种类和数量也从另一个角度证实了它有着很强的环境适应能力，也与其内部结构的复杂性和完善性密不可分。

第一节 根

植物的根部一般都位于地下，它一直为植物的生长默默地做着工作，担负着把植物固定在地面上、吸收土壤中的水分和矿物质，以促进植物生长的重任，为植物更好地抽枝长叶和开花结果尽心付出。同时，根还能有效改良土壤结构，使土壤变得更加适合植物生长。

根对植物的生长而言，主要有三个方面的作用：首先是对植物体的固定支撑。这一点对于被子植物尤其重要，因为多数被子植物的树干都非常高大，需要有无数发达、壮实的根系紧紧地抓住土壤，这样植物才能站得更安稳，即使遇上狂风暴雨也不会折断。其次，吸收植物体生长所需的水分和矿物质。植物根尖的表面生长着细细的根毛，这些根毛虽然又细又小，但植物体能从土壤中吸收水分和矿物质靠的都是它们。这些根毛伸展在土壤中，就像一台台微型“抽水机”，土壤中大部分的水分和矿物质都能抽取出来。第三，根可以有效改良土壤结构，让土壤能更好地促进植物的生长。

不过，植物界中并不是所有根都拥有上述三个作用，还有许多千奇百怪的根，有着特殊的使命。例如，有些根专门用来呼吸，被称为呼吸根；有些根主要用于支撑植物体，被称为支柱根；有些根用来储存营养物质，这类根通常有肥厚的肉质，所以又被称为储藏根；还有一些根专

门吸收其他植物的营养，被称为寄生根，等等。

植物的根通常情况下呈圆锥形，分为主根和侧根两个部分。主根是植物根中最粗壮的部分，侧根则是主根上长出来的一些细小的根。有些植物的主根和侧根十分明显，很容易就能分辨出来，如大豆、油菜等；而有些植物的主根和侧根就很难分辨出来，如玉米、小麦。植物根的顶端部分又叫作根尖，根尖由根冠、分生区、伸长区和根毛区（也称成熟区）四个部分组成，其中，根毛区的主要任务是吸收土壤中的水分和矿物质。

第二节 茎

植物的茎是植物最显著的部分，类似于人类的躯干。由于茎的存在，植物的根、芽、叶和花才能连成一个整体。同时，茎还发挥着向植物体输送根部吸收的水分和养料的作用。

植物的茎包含了芽、节和节间三个部分，茎的顶端是茎尖，整个茎都是由茎尖不断分裂而形成的。此外，茎尖又分成了分生区、伸长区和成熟区三个部分。一般说来，茎有直立型、缠绕型、匍匐型和攀缘型四种不同的类型。直立型是指直立向上生长的茎；缠绕茎是指缠绕着支撑物向上生长的茎，如牵牛花；匍匐茎是指在地面上生长的又长又柔软的茎，如地瓜、西瓜等；攀缘茎则是指根据自身结构，攀缘着支撑物生长的茎。

不过，并非所有植物的茎都属于这四种类型，许多植物在不断适应环境的过程中，演化出了许多变态茎，这一点与根的演化相似。植物的这些变态茎虽然形式多样，但总体来说可以分为两类：一类是如豌豆这样的地面上的变态茎；另一类则是如马铃薯的块茎那样在地底下的变态茎。此外，一些植物还演化形成了茎刺，这也是它们为了避免受到动物伤害而形成的变态，这一类茎刺的主要作用是保护植物，如山楂、柑橘。皮刺则是另一种变态茎，皮刺与乔木植物茎生长的变态刺有着很大区别，它们从茎的外部生长出来，主要作用是保护自身。但与茎刺比起

来，它的杀伤力要小得多，也更容易脱落。

根据植物茎的形态，还可以将其分为草本类和木本类两类。草本类的茎较为矮小和柔弱，含有较多水分；木本类的茎则比较坚硬，并且分为灌木和乔木两种。灌木的躯干不太明显，植株矮小；乔木则刚好相反，躯干显著，植株也很大。

茎不只是植物的支柱，支撑着整个植物的躯干和繁茂的枝叶，还构建了植物体的运输系统，输送着来自植物根部从土壤中吸收的水分和无机盐。此外，茎还可以输送叶子制造出来的有机物，为植物的生长创造良好的环境。许多植物的茎还有储存水分和养料的功能，以便植物体能够更好地吸收。

既然水分和无机盐的输导由茎的导管完成，那么水分和无机盐是怎样沿着茎向上传导的呢？这主要是由于水分和无机盐受到了根压和叶的蒸腾拉力作用。根压是指由根部产生的压力，这种压力可以使水分和无机盐形成的溶液进入到茎中，并沿着茎壁上升。如果将植物的茎在靠近基部的地方切断，就会看到有液体从断口处流出，这就是根压形成的结果。此外，叶子的蒸腾拉力作用，是叶片在不断蒸腾水分的过程中产生的向上的拉力，这股拉力促使水分沿着茎不断上升。

叶子制造出来的有机物是植物汲取生长所需要的养分的重要途径，这些有机物主要通过茎韧皮部位的筛管传输到植物体的各个器官中。不过，在筛管中传输的有机物必须是小分子物质，且能够溶解于水中。诸如淀粉、蛋白质、脂肪等大分子物质，是不能被筛管输送的，只有当大分子物质分解成小分子的葡萄糖、氨基酸或是甘油脂肪酸等物质后，才能被筛管输送到各个器官。因此，如果树皮被大面积破坏，植物很快就会死去。这是因为植物根部长期得不到有机养料，根部死亡继而导致整株植物死亡。

第三节 叶

叶子是植物进行光合作用的场所，更是孕育植物生命最基础、最重

要的部分。自然界中的植物叶子尽管各种各样，但它们的结构大致相同，大部分都是由叶片、叶柄和托叶三个部分组成。但是，有一些植物不含托叶，也有一些植物没有叶柄，还有一些植物则没有叶片。

叶片的表皮由一层排列紧密、透明的细胞组成，表皮细胞的细胞壁有角质层或蜡层，对里面的物质起着保护作用。位于叶片的上表皮和下表皮中间的绿色薄壁部分，被总称为叶肉，里面含有大量的叶绿体，这是叶片进行光合作用的重要场所。叶片上表皮是接受光照的一面，呈深绿色；下表皮则是背对阳光的一面，呈浅绿色。由于叶片两面的受光度不同，因此内部的叶肉组织也常出现分化，这种叶子被称为异面叶；大多数单子叶植物和少数双子叶植物的叶子，都是以近似直立的姿态生长的，这样叶子两面的受光情况均匀，内部的叶肉组织也就不会出现明显的分化，这种叶子被称为等面叶，如玉米、小麦、胡杨等。异面叶向上一面的表皮叶肉细胞呈长柱形，排列紧密，上面的长轴常与叶表面垂直，并呈栅栏状，所以被称为栅栏组织，通常由1至3层组成；而背光面的叶肉细胞所含的叶绿体比较少，排列疏松，细胞之间的空隙也较大，呈海绵状，所以也被称为海绵组织。

叶柄是叶片与茎的连接部分，常位于叶片的基部，上端连接着叶片，下端连接着茎。不过，少数植物的叶柄着生在叶片中央或偏下方的位置，被称为盾状着生，如莲、千金藤。植物的叶柄通常呈细圆柱形或扁平形。

托叶是生长在叶柄基部、两侧或叶部的细小绿色物质或膜质片状物，托叶通常要比叶片生长得早，早期可以起到保护嫩叶和幼芽的作用。托叶一般较为细小，植物的种类不同，其托叶的大小和形状也会有所不同。有一些植物的托叶存在的时间很短暂，随着叶片的生长会很快脱落，只留下一个不引人注意的痕迹，这一现象又称为托叶早落，如石楠的托叶；还有一些植物的托叶则能够存在很长一段时间，甚至伴随叶片的整个生长期，这叫托叶宿存，如茜草、龙芽草。

第四节 花

花是被子植物的繁殖器官，虽然花的大小和颜色不同，但大多数花都是由花梗、花托、花萼、花冠、雄蕊和雌蕊等部分组成。

花梗是支撑花朵生长的柄，所以也被称为花柄。花梗的长短随着植物大小的不同，也会有所不同，大部分花的花梗都不太长，有些植物的花梗非常短，甚至有些植物没有花梗。

花托是花梗顶部着生花萼、花冠、雄蕊和雌蕊的膨大部分，形态多种多样。花萼则位于花朵的最外层，通常呈绿色，大小不一，对花蕾起保护作用。花萼由若干个萼片组成，大多数植物的花萼会随着花冠的枯萎一起脱落，但也有一些花萼不会随着枯萎的花冠脱落，而是随同子房一起长大，如石榴、茄子。有一些植物的花萼外面长有一层绿色萼片，这层萼片呈叶状，叫副萼，如棉花和蛇莓。

花冠位于花萼内部，由若干个花瓣组成，并排列成一圈或者多圈。大部分植物的花冠都有着绚丽的色彩，但也有一些植物的花瓣是白色的，与花萼相似，花冠也有分离和结合两种情况。分离的花萼称为离瓣花，如蚕豆、桃花；结合的花萼称为合瓣花，如桂花。在鉴别植物时，对于离瓣花和合瓣花的了解非常重要，因为被子植物中的许多科和属的植物，其花冠的分离和结合通常具有一致性。花萼和花冠合称花被。假如一朵花中，不仅存在花萼和花冠，而且两者还有着显著的不同，则被称为双被花，如油菜和番茄的花；如果两者中缺少了一个，则被称为单被花，如榆树和桑树的花；如果两者都不存在，这样的花被称为无被花，如垂柳的花。

雄蕊位于花冠的内侧，它是可以产生花粉粒的器官，由花丝和花药组成。花丝呈细长的丝状，但也有一些植物的花丝是扁平如带状的，也有一些转化为花瓣状，如美人蕉；还有一些植物没有花丝，花药直接长在花冠上，如栀子。花药由四个花粉囊组成，花粉囊在成熟之后会自行破裂，花粉通过裂口向外散出。雄蕊跟花冠相似，也具有分离和结合两种情况：花药分开仅花丝结合成一束的，被称为单体雄蕊，如木槿和棉花；花丝联合成两部分的，被称为两体雄蕊，如蚕豆；花丝结合成多束的，被称为多体雄蕊，如金丝桃；花丝分离，仅花药结合的，被称为聚药雄蕊，如葫芦科植物。

雌蕊位于花的中间部分，是能够生成卵细胞的器官。雌蕊通常由子房、圆柱形的花柱和柱头组成。雌蕊由拥有生殖能力的变态叶逐渐演化而来，这片变态叶被称为心皮，这是构成雌蕊的基本单位。一些植物的雌蕊由一个心皮构成，如桃花；但大部分的子房由两个或多个心皮构成，它们互相结合，形成共同的子房，但花柱、柱头可以结合也可以分离，我们将其称为合生心皮雌蕊。还有一些植物的花有两个或两个以上的心皮，但心皮没有结合，而是彼此分离，每个心皮都单独形成一个雌蕊，有各自的子房、花柱和柱头，这就是离生心皮雌蕊。柱头是接受花粉粒的地方，所以通常是膨胀状或扩展成其他形状，没有柱头的雌蕊是不存在的；花柱是柱头和子房之间连接的部分，多数花柱都又细又长，但也有一些植物的花柱非常短，甚至有些植物的花柱并不明显，如虞美人；子房中间的部位是空的，这个部位叫作子房室，生长着将要发育成种子的胚珠。

第五节 果实

果实是被子植物独有的特征，这意味着，只要是孕育果实的植物都属于被子植物；当这类植物受粉之后，就会逐渐发育成果实。

果实一般由果皮和种子两部分构成，主要起到传播和繁殖后代的作用。大多数被子植物的果实都由子房发育而成，被称为真果，如桃子和大豆的果实；也有一些植物的果实由子房和花被或者花托一起发育而成，被称为假果，如苹果、梨及瓜果。大部分植物仅拥有一个雌蕊，其形成的果实被称为单果；也有一些植物拥有许多离生雌蕊，聚集在花托上，每个雌蕊都能形成一个果实，被称为聚合果，如草莓；还有一些植物的果实由花序发育而成，我们把这种果实称为复果，如桑、凤梨和无花果。

构成果实的果皮分为外果皮、中果皮和内果皮三部分，由于果实种类繁多，所以果皮也多种多样，而且结构各异。果实在受精之后的体积比受精前大出两三百倍，果实成熟之后的大小和形状皆由遗传因素决定。被子植物的果实有许多种，分类方法多种多样，除了我们前面讲

的，根据果实的来源和发育情况，分为真果、假果、聚合果、复果外；还根据果实成熟之后果皮的干燥程度，分为干果和肉果；又根据干果成熟后是否裂开，分为裂果和闭果，等等。果实在成长和发育的过程中，不仅会发生形状上的变化，也会发生结构上的变化，而且生理方面也会出现一些变化。通常情况下，果实的颜色首先会发生变化，而颜色的变化是判断果实是否成熟的标志之一；其次是果实的质地、散发出来的香味及其含有的糖分等都会发生变化。

第六节 种子

植物的种子具有延续植物的生命、繁殖后代的作用，而且也是裸子植物和被子植物特有的繁殖器官，自然界中能够产生种子的植物有20多万种。

种子的大小、形状、颜色根据植物种类的不同也会有所差异：椰树有着很大的种子，芝麻的种子却很小，而烟草、马齿苋的种子就更小了；蚕豆的种子是肾脏形的，而豌豆的种子是圆球形的；有些植物拥有光滑明亮的种子，而有些植物的种子则暗淡无光。种子之间的差异在生物学上有着重要意义，例如，尽管椰树的种子非常大，容易发芽，还含有丰富的胚乳，能保证其生长过程中有充足的营养，但椰树的种子产量有限；而种子比较小的，数量则比较多，哪怕只有一部分种子能够发芽，也依然能够产生大量后代，大多数杂草植物都是通过这种方式进行后代繁殖的。

植物的种子通常由种皮、胚、胚乳三个部分构成，种皮由珠被发育而成，对里面的胚和胚乳起着保护作用。裸子植物的种皮分为外层、中层和内层，其中，外层和内层是肉质层，中层是石质层；被子植物的种皮结构多种多样，有的像纸一般薄，而有的非常坚硬。胚由受精卵发育而成，正常情况下的胚由胚芽、胚釉和子叶、胚根组成，不同种子之间子叶数目不同，子叶数目的变动在1至18个之间，但大部分子叶都为2个，如苏铁、银杏等。被子植物的胚形状多样，有椭圆形、长柱形、弯曲形、马蹄形和螺旋形，尽管胚的形状不同，但在种子中的位置是固定

的，胚根通常会朝着珠孔。胚乳是单倍体的雌配子体，多数都很发达，里面储存着淀粉或者脂肪，也有的储存着糊粉粒，颜色通常呈淡黄色，少数是白色，但银杏成熟后，种子中的胚乳会呈现绿色。多数的被子植物在种子的发育过程中都会形成胚乳，但某些种类只具有少量的胚乳，而有些种类甚至没有胚乳，这是因为它们的胚乳在发育过程中被胚分解吸收，这是划分种子是否含有胚乳的重要依据。当然，不同植物的种子中含有的胚乳数量以及储存的物质都不相同，其中，最常见的储存物质是淀粉、蛋白质和脂肪，可能还会储存碳水化合物等物质。

尽管种子离开母体之后依然是活的，但它也是有一定寿命的，不同植物的种子有着不同的寿命，这是由遗传因素决定的，此外还会受环境的影响。有些种子的寿命非常短，如巴西橡胶的种子，生存期仅为一周左右；而有些种子的生命很长，如莲的种子可达好几百年，甚至上千年。

矿物卷

矿物是地球提供给人类的它所蕴藏的资源，正是有了这些大自然的馈赠，人类才得以繁衍生息。矿物是天然生成的，是游离的元素或者化合物，也是构成地壳中岩石的最小单位。矿物通常是通过无机作用构成的均匀固体，矿物的晶体结构和化学组成都是相对稳定的，可以在特定的物理环境中稳定存在。

矿物资源被利用的程度标志着各个时代科技与文明发展的水平。

第一章 自然元素矿物

自然元素矿物是指没有与其他元素结合的单质矿物，主要分为如金、银、铜等的金属元素，如砷、锑的半金属元素及如碳、硫等的非金属元素三大类。金属元素具有密度大、柔软且可延展、不透明等特点，常常以不规则的树脂状和纤维状产出；半金属元素的特点则是导电性较差，常常以块状产出；非金属元素是绝缘体，常形成晶体结构，呈透明或者半透明状。

第一节 金、银、铜、铂

自然金主要产于高温或者中温溶液形成的石英脉中，或产于与火山热液作用相关的中温、低温热液形成的矿床中，它们往往与石英、硫化物结合在一起。此外，没有凝固起来的砂积矿床和吵岩中也含有自然金，甚至河床中也会发现颗粒状或者块状的沙金。

自然金通常以树枝状、粒状或鳞片状产出，偶尔也会出现不规则的大块体。它的晶体形态以八面体为主，其次是菱形十二面体，偶尔会出现立方体，但不常见。颜色呈金黄色，有着一定的光泽。随着含银量的增加而渐变成淡黄色。

世界上著名的自然金产地是南非的维特瓦特斯兰、美国的加利福尼亚和阿拉斯加、澳大利亚的新南威尔士、加拿大的安大略以及俄罗斯的乌拉尔和西伯利亚等地。

自然银通常形成于热液矿脉中，它们与金等含银矿物以及金属硫化物共同存在于矿床的氧化带中。银多为不规则的纤维状、树枝状和块状聚集在一起的集合体，有时呈平行带状。银的完整单晶体非常少见；银的新鲜断口呈银白色，但表面常呈灰黑的锖色和条痕银白色。银具有很好的延展性、导电性和导热性，熔点较低，若暴露于硫化氢蒸气中，就

会失去光泽。墨西哥和挪威是世界著名的银产地。

自然铜是各种地质作用过程还原条件下的产物，常见于原生热液矿床、含铜硫化物矿床氧化带下部及砂岩铜矿床中。通常含有微量的铁、银、金等元素，最常见的是片状、块状、板状和树枝状聚集在一起的集合体。铜的晶体主要是等轴晶系，但完整的晶体极为少见。在对自然铜的质量进行鉴定时，重要的标准是颜色。自然铜的新鲜切面的颜色是铜红色或者浅玫瑰色，而氧化之后的颜色是褐黑色或者绿色。

铜有着非常好的导电性、导热性和延展性，主要包含在金属矿脉中的沉积岩和火成岩的接触带，也见于变质岩中。美国的苏必利尔湖南岸、俄罗斯的图林斯克以及意大利的蒙特卡蒂尼等地区都是世界著名的自然铜产地。

自然铂生成于与基性、超基性岩有关的岩浆矿床，如铜镍硫化物的矿床中，砂矿中也会形成。铂的颜色呈银灰色或者白色，条痕则为钢灰色，具有一定的金属光泽；铂具有延展性，微带磁性；铂的晶体形状是立方体，但很少见，最常见的是不规则的细小颗粒末状、粉状、葡萄状聚集在一起的集合体。

铂具有高度的化学稳定性，熔点高而难以熔化，因此常常被当作高级化学器皿的制造原料，或者与镍等物质制成特种合金。世界上著名的铂的产地是加拿大、美国和俄罗斯的乌拉尔等地。

第二节 砷和锑

自然砷通常与银、钴、镍等物质共生于炙热的矿脉中，最常以粒状、葡萄状或钟乳状聚合在一起的集合体产出，偶尔会形成棱面体晶体。氧化之后的砷呈深灰色至黑色、灰色或白色，不透明、脆性，有金属光泽，有毒，刚受热或者被敲打时，会散发出像大蒜一样的味道。

砷可消除因铁杂质而造成的玻璃绿色，因而经常被用于玻璃制造；在古代，砷多被用来制作毒药和杀虫剂；在电子行业，用砷制成的计算

机芯片，性能比硅芯片更为优越。欧洲、美国、日本和哥伦比亚不列颠省的奥德尔等地都是世界知名的砷产地。

自然锑通常与砷、银、方铁矿、黄铁矿等物质共生于炙热的矿脉中，锑的主要晶体形状很难见到，是假立方体。最常见的锑是钟乳状、块状、放射状聚集在一起的集合体，颜色呈铅灰色，略带一点蓝色；条痕则呈黑色，不透明，具金属光泽。自然锑常与其他金属进行混合，以保证金属在温度发生变化时体积不会变化；锑还可用于烟花爆竹、火柴头、点火工具等制作中；也可用作医药研究或有色玻璃的燃料。锑的主要生产地是法国、芬兰、澳大利亚、南非和德国的黑森林等地。

第三节 硫、金刚石和石墨

自然硫的晶体通常情况下呈菱方双锥形或者是厚板状、块状、粒状、条带状、球状、钟乳状等聚集在一起的集合体，硫的颜色为柠檬黄，也有一些是蜜黄或黄棕色；断口处的油脂光泽；性脆，透明状或半透明状。

自然硫产于火山岩、沉积岩及硫化矿床分化带和温泉周围，经常与方解石、白云石、石英等矿物组合产出。自然硫的成分不纯净，一般夹有黏土、有机质、沥青和机械混入物等，且不导电，但在摩擦时有负电产生。自然硫的形成有着不同的途径，最主要的是由生物化学作用形成的沉积硫矿床和火山成因的自然矿床。自然硫的主要作用是制作硫酸，还被广泛应用在造纸、纺织制造和化肥等方面。

金刚石常常产于超基性岩的角砾云母橄榄岩中，晶体的形状通常呈立方体、四面体、八面体和十二面体，并带有弯曲的晶面。金刚石的晶体结构模型是：每个碳原子都被四个相邻的碳原子所包围，而且处在这四个碳原子的中心位置，通过共价键和碳原子结合在一起，构成了彼此连在一起的立体网状晶体。金刚石以带放射结构的圆形块体和微晶块体产出，颜色多样，如白、灰、黄、红、蓝等，正因为这些绚烂的色彩，令金刚石成为价值昂贵的宝石。又由于金刚石非常坚硬，因此常常用于

工业切割，比如我们常用的玻璃刀就是用金刚石制成的。

金刚石和石墨的化学成分都是碳元素构成的，称为“同素异性体”，但它们在特性上却有着非常大的区别：金刚石是已知的最硬的物质，而石墨是最软的物质之一。石墨是碳质元素结晶矿物，它的结晶体是六边形的层状结构，常常以块状、叶片状、粒状的集合体产出。

石墨质地非常软，颜色呈黑灰色，在隔绝氧气的情况下，熔点超过了3000 度，因此它的耐高温性很强。此外，石墨有着非常好的导电性和导热性。自然界中，基本不存在纯净的石墨，它们往往夹杂着水、沥青等物质。石墨的工艺特征主要取决于它的结晶形态，所以根据不同结晶形态，天然石墨被分为三类，第一类是致密结晶状石墨，第二类是鳞片石墨，第三类是隐晶质石墨。石墨被广泛运用到工业上，主要用来制作冶炼用的高温坩埚、机械工业的润滑剂，还可以用作冶金工业中的耐火材料和涂料、军事工业中的火工材料安定剂，以及轻工业中的铅笔芯、电气工业中的碳刷、电池工业中的电极、化肥工业中的催化剂等。

第二章 硫化物和硫酸矿物

硫化物是金属元素或者半金属元素与硫元素化合而成的天然化合物，假如以硒、碲、砷、锑、铋替换硫，那么便会生成硒化物、碲化物、砷化物、锑化物、铋化物。硫化物是很重要的铅、锌、铁、铜等矿石，但由于很容易氧化为硫酸盐，因此一般形成于水位比较低的炙热矿脉中。

硫酸矿物是指硫与金属元素或者非金属元素结合在一起形成的天然化合物，它们的性质与硫化物的性质类似。

第一节 方铅矿和辰砂

方铅矿主要形成于中温热液矿床中，常与闪锌矿结合形成铅锌硫化物矿床，也可形成于接触交代矿床中，与萤石、石英、方解石和黄铁矿一起共生。方铅矿的晶体是立方体，有时为八面体与立方体的聚形，其聚合体常常呈粒状和致密块状，不透明；颜色呈铅灰色，条痕呈灰黑色，有金属光泽。

方铅矿实际上就是硫化铅，其中硫和锌的含量比是1：1，这是一种常见矿物。方铅矿是提取铅的重要原料，古代的航海家常常利用提炼出来的铅，对船底附生的藤壶生物做清理。铅也是制造兵器必不可少的原料，而且是制作屏蔽放射性核辐射的原料。但是，对人类而言，铅有害的一面也很明显。有研究表明，古罗马并非因女色而覆灭，铅中毒可能才是祸端，因为他们在生活中常常使用铅制品。目前，微量元素分析数据显示，过量的铅尘和大量铅化物的废尘会严重威胁人体的健康。

方锌矿的主要产地是美国的新密苏里、澳大利亚的布罗肯希尔等。

辰砂是汞的硫化物，是提炼汞的重要原料。又被称为丹砂、朱砂，

颜色呈棕红色或者猩红色，晶体表面具有光泽，条痕呈红色，半透明，晶形为板状或者柱状，常常见到的是双晶。辰砂晶体可作为激光技术中的重要原料，并且有药用价值，具有镇静安神、杀菌的作用。此外，由于辰砂晶体有着独特的造型，加上绚烂多彩、含蓄质朴，成为天然的观赏石，受到人们的喜爱，这也是大自然赐予我们的精美礼物。

辰砂的主要成分是硫化汞，汞含量高达85.4%。辰砂也不是纯净的，常混有一些杂质，比如沥青、雄黄、磷灰石等。辰砂常常与雄黄、黄铁矿一起形成于火山道或者温泉的周围，还会出现在火山周围的矿脉和沉积岩中，与白铁矿、蛋白石、石英及方解石等结合共生。西班牙的阿尔马登、意大利的尤得里奥、美国的加利福尼亚沿岸山脉等地都是辰砂的著名产地。

第二节 闪锌矿、硫镉矿和辉锑矿

闪锌矿的主要成分是锌、铁、硫，而且含有各种类质同象物质，主要存在于接触矽卡矿岩矿床中和中、低温热液成因矿床中。闪锌矿是分布最广的矿物，蕴含着丰富的锌，常常与白云石、石英、黄铁矿、方铅岩、重晶石、方解石等结合共生。闪锌矿的晶体通常是四面体或者菱形十二面体，晶面有一定弯曲度；颜色随含铁量的不同而呈现出不同，当铁的含量增多时，其颜色由浅变深，从淡黄色到黑色，从透明到半透明。

鉴定闪锌矿的方法是，加入稀盐酸后观察是否反应生成硫化氢，并散发出类似于臭鸡蛋的气味。质地纯净的闪锌矿不易熔化，是提炼锌的重要矿物原料，其中含有的镉、铟、镓等稀有元素，价值巨大。澳大利亚的布罗肯希尔、美国的密西西比河谷等地是世界全著名的闪锌矿主要产地。

硫镉矿属于表生矿物，经常与含镉闪锌矿或者纤锌矿一起存在于硫化物矿床的氧化带中。硫镉矿的晶体为柱状或者锥状，但最常见的是呈土状覆盖于其他矿物表面。硫镉矿的颜色是黄橙色、暗橙色或者红色；

条痕则从橘黄色到砖红色；半透明到透明，有着一定的松脂般或金刚光泽；纹理清晰，断口处常呈现出贝壳状。硫镉矿主要用来提炼镉或者制造镉黄等镉化合物，是冶炼铅和锌后生成的副产物。美国、英国、捷克和斯洛伐克等地是硫镉矿的主要产地。

辉锑矿主要存在于中低温的热液矿床中，主要富集于辉锑矿构成的石英脉或碳酸盐矿层中。辉锑矿的颜色和条痕都是铅灰色，晶体呈柱状，柱面上有纵向条纹分布，而且大部分晶体呈弯曲状，甚至有一些是卷曲反射状的集合体，还有一些是针状、纤维状、粒状和致密状的集合体。由于辉锑矿的晶体集合体姿态万千，因此不仅具有观赏价值，其收藏价值也极高。辉锑矿是提炼锑的重要原料，天然产出辉锑矿可以制成安全火柴和胶皮。我们常用的铅笔，在制作中除了石墨和黏土外，也需要加入20% 的辉锑矿。此外，辉锑矿还被应用到制作耐摩擦的合金中，如铜锌锡合金。

第三节 斑铜矿、黄铜矿和辉铜矿

斑铜矿是铜和铁的硫化物矿物，铜的含量大约是63.3%，是提炼铜的重要原料矿物之一。斑铜矿存在于热液成因的斑岩铜矿中，与黄铜矿、石英、方铅矿等矿物一起共生；也会出现在矽卡岩矿床中和铜矿床的次生富集带，但因稳定性差，常常被次生辉铜矿或者铜蓝置换。斑铜矿的晶体是立方体、八面体、菱形十二面体，晶面常有弯曲、不平坦，一般呈密块状或者规则的粒状。斑铜矿的颜色是暗铜红色，表面风化之后常被一层蓝紫斑状锖色覆盖，呈蓝色或紫色，因而又被称为“孔雀石”。条痕为灰黑色，不透明，具有金属光泽。美国蒙大拿州的比尤特、墨西哥的卡纳内阿、智利的丘基卡马塔等地是斑铜矿的代表性产地。

黄铜矿的化学成分是$CuFeS_2$，存在于硫化物矿床中。黄铜矿的晶体是四方体，一般是双晶，晶体表面有许多条纹。集合体常为不规则的粒状或者致密的块状，颜色呈黄铜色，表面有斑驳的蓝紫色晕彩，条痕为绿黑色，具有金属光泽且不透明。黄铜矿看起来和黄铁矿、自然金相似，但其硬度偏低，没有黄铁矿的硬度高；黄铜矿中的绿黑色条痕能够

溶解在硝酸中，而自然金不能溶于硝酸。黄铜矿是铜矿石中很重要的一种，也是常见的硫化物，几乎可在不同的环境下形成。但主要生成于热液作用和接触交代作用，常可形成于具有一定规模的矿床中。黄铜矿在工业上的应用主要是炼钢。主要产地是西班牙的里奥廷托、德国的曼斯菲尔德、瑞典的法赫伦、美国的亚利桑那州和田纳西州、智利的丘基卡马塔等地。

辉铜矿的主要成分是Cu_2S，常与石英、方解石等矿物共同存在于炙热的矿脉中，最常见的晶体为块状集合体。颜色为暗深灰色，不透明，带金属光泽；可溶于硝酸，燃烧时的火焰呈绿色，同时释放出二氧化硫气体。辉铜矿是所有铜的硫化物中含铜量最高的，达到了79.86%，因此是提炼铜的重要原料。辉铜矿主要分布在美国阿拉斯加州的肯纳科特、内华达州的伊利、亚利桑那州的莫伦西以及纳米比亚的楚梅布等地。

第四节 黄铁矿、磁黄铁矿和白铁矿

黄铁矿常存在于岩浆岩、沉积岩、变质岩的副矿物中，含有钴、镍、锌等物质。黄铁矿的晶体为立方体、八面体、五角十二面体，表面布满条纹，由致密的块状、粒状、结核状聚集在一起形成集合体；颜色呈淡黄色，条痕呈绿色、黑色，具有强金属光泽，不透明。由于黄铁矿的颜色呈浅黄棕色，又有着强金属光泽，因此常被误认为是黄金，故得名“愚人金”。黄铁矿是分布范围最广泛的硫化物，也是提取硫和制造硫酸的重要原料。西班牙、捷克、斯洛伐克、美国等是黄铁矿的著名产地。

磁黄铁矿分布于各种磁性岩浆矿床中，常与黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿、毒砂等物质一起共生。磁黄铁矿的晶体为板状或者片状，颜色从黄色到红色，氧化之后呈棕色；条痕从灰色到黑色，具有金属光泽，而且不透明。磁黄铁矿是制造硫酸的主要原料，通常呈致密块状，产于多种金属矿床中，但主要富集于铜镍硫化物矿床中。磁黄铁矿导电性高，略有磁性，在经济价值方面虽然比黄铁矿低一些，但因其含镍较多，可作为镍矿石使用，也可用于含重金属废水的净化处理。此外，磁黄铁矿还

被广泛应用到石油化工、冶金、橡胶、造纸、军事、食品等行业中。

白铁矿和黄铁矿一样都属于硫化物矿物，但晶体结构不一样，外观也就大不一样。白铁矿主要存在于页岩、黏土岩、石灰岩中，在自然界的分布范围要比黄铁矿少一些，而且不会有大量聚积；白铁矿是FeS_2 的不稳定变体，当温度超过350 ℃时，便会转化成黄铁矿。白铁矿的晶体形态多样，最常见的是板状和椎体状，由于是双晶，因此晶体表面通常弯曲，形成鸡冠状晶体；晶体颜色为淡白色，风化之后会变成黑色；条痕呈黑绿色，具有金属光泽，不透明。白铁矿在全世界分布范围广泛，主要产地是美国、英国、德国等国家。

第五节 脆银矿、深红银矿和车轮矿

脆银矿主要存在于银脉矿的矿床中，常与自然银、硫化物及其他盐酸类如辉银矿等物质共生。晶体为板状或柱状，晶面上分布着斜线条纹，有时是双晶，也有以块状的集合体产出；颜色铁黑，条痕呈黑色；具有金属光泽，而且不透明。脆银矿易于熔化，能溶于硝酸。脆银矿在世界的主要产地是挪威的康格斯伯格、智利的占那尔西诺。

深红银矿又叫作浓红银矿或硫锑银矿，与其他硫盐类及矿物，如黄铁矿、方铅矿、石英、白云石等一起共生于炙热的矿脉中。深红银矿的晶体为柱状或者三角面体，有时呈双晶，晶体两端不对称，所以也会呈块状、致密状的集合体。深红银矿的颜色是暗樱红色，条痕呈绛红色，具有金属光泽。深红银矿主要产于墨西哥、玻利维亚、德国、美国等地的一些银矿床中。

车轮矿主要分布于中低温的热液矿床中，但数量不多，而且常常出现在铅锌和多金属矿床中，与晚期硅化阶段有着紧密的联系。在低温锑矿中，为早期分析出的矿物，在氧化带中，则易分解为孔雀石、白铅矿及氧化锑。车轮矿与方铅矿、银、黄铜矿、石英等物质共生，晶体为短柱状或者板状，常为双晶，晶体表面有条纹，也以块状、粒状、致密状的集合体出现；车轮矿的颜色从灰色到黑色，条痕呈灰色，具有金属光

泽，而且不透明。俄罗斯的乌拉尔、捷克的普尔西布蓝、智利的华斯科爱尔多、英国康威尔的惠尔博爱斯等地是车轮矿的主要产地。

第六节 黝铜矿和砷黝铜矿

黝铜矿是一种铜和锑的硫化物矿物，常常产于矿脉中，与铜、银、铅和锌等物质共生，黝铜矿的晶体为四面体，双晶，晶面为三角形，也以块状、粒状、致密状的集合体出现。黝铜矿的颜色从灰色到黑色，条痕的颜色从棕色到红色，具有金属光泽，而且不透明。某些变种的黝铜矿中含有银，含量可达18%，因此这是提炼银的重要原料，也令其成为价值很高的银矿物。世界大多数多金属矿床中都含有或多或少的黝铜矿。

砷黝铜矿主要产于铜、铅、锌、银等硫化物的矿床中，而且与其他含铜矿物共生。砷黝铜矿的分布范围虽然很广泛，但比较少出现富集的情况；常见于各种成因的炙热矿床和多种硫化物的共生组合中，主要分布于中温热液矿床中，与黄锡矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿等物质共生。砷黝铜矿的晶体为四面体，双晶，晶体表面为三角形，也以块状、粒状、致密状的集合体出现；颜色呈深钢灰色，条痕从棕色到红色，具有金属光泽，有些会异常明亮，不透明。砷黝铜矿可以用来提炼铜和砷，因此经济价值很高，但数量非常少，仅仅在美国、俄罗斯等少数地区发现。

第三章 卤化物

卤化物是金属元素和卤元素结合产生的化合物，常常出现在多种地质环境中，某些卤化物，如石盐，常产于蒸发岩地层，而其他卤化物，如萤石，则主要存在于炙热的矿脉中。大多数卤化物是立方对称晶体，而且比重很小。按组成元素的属性，卤化物分为金属卤化物和非金属卤化物；按组成卤化物的键型，分为离子型和共价型。

第一节 石盐、钾石盐和氯银矿

石盐是氯化钠的矿物，常用以表示由石盐组成的岩石，也被称为盐、岩盐，主要于盐湖中形成，常与石膏、白云石的物质共生。石盐晶体是立方体，晶体表面存在一些凹陷，还会出现块状、粒状、致密状的集合体；石盐的颜色多种多样，纯净的石盐无色透明，含杂质时呈白、黄、蓝、紫、黑等，但条痕都是白色的，从透明到半透明，具有玻璃光泽。石盐不仅是重要的化工原料，也是民用和工业上无数产品必需的钠和氯的来源。此外，在食品加工业中，石盐也有着重要作用。因此，全世界有七十多个国家在大量开采石盐。如果石盐层在地下比较浅的地方，那么可以挖竖井到达石盐层，通过地下开采的方式进行开采。此外，还有另一种非常简单的萃取法，用水泵把水打到含盐层中，再将卤水抽到地面上，通过蒸发卤水提取得到石盐。

钾石盐也被称为钾盐，这是一种蒸发岩矿物，由含盐溶液沉积形成，常与石膏、石盐等物质共生。钾石盐的晶体是六面体，主要是粒状、块状的集合体；纯净的钾石盐是无色透明或呈白色，含有杂质的往往是红色、黄色、蓝色等颜色，条痕呈白色，具有玻璃光泽，而且不透明。大部分钾石盐用来制造钾肥，小部分钾石盐用来提取钾和制造钾的化合物，钾石盐是提取钾的主要物质，无色透明的大晶体可以用来制造光学材料。俄罗斯的乌拉尔，白俄罗斯，加拿大的萨斯喀彻温省，德国

的马格德堡和汉诺威以及美国新墨西哥州的特拉华盆地等都是钾石盐的主要产地。

氯银矿是银矿床氧化带的次生矿物，产于干热地区的银硫化物矿床的氧化带中，由银硫物氧化后形成的易溶银硫酸盐和下渗的含氯的地表水反应而成。氯银矿的晶体十分罕见，一般是块状或者薄片状，主要是皮壳、蜡状的集合体。新鲜切面无色，风化之后切面为绿色、黄色或者紫色，具有金刚光泽，从透明到半透明。氯银矿可以熔化在蜡烛的火焰中，而且能溶解在氨水中，但不能溶于硝酸。氯银矿具柔性和可塑性，易切割；大量产出时可作为提炼银的矿物原料。智利、秘鲁和玻利维亚等都是氯银矿的著名产地。

第二节 光卤石、冰晶石和萤石

光卤石是钾和镁的卤化物，是含有镁、钾的盐湖蒸发之后形成的矿物，常与石盐、钾石盐等物质共生。其成因与沉积岩如泥灰岩、黏土岩、白云岩相关。光卤石以晶体产出时是六面锥体，但非常罕见，通常是块状、粒状的集合体。纯净光卤石呈白色或无色，含有少量氧化铁的光卤石呈红色。从透明到不透明，新鲜面具有玻璃光泽，在空气中极易潮解，易溶于水，而且呈现出油脂光泽。光卤石主要用作提炼金属镁的精炼剂，生产铝镁合金的保护剂。也可用来制造钾肥和提取金属镁的矿物原料，以及铝镁合金的焊接剂、金属的助熔剂、生产钾盐和镁盐的原料。此外还用于制造肥料和盐酸等，因此经济价值巨大。世界著名的光卤石矿床的分布地是德国的施塔斯福特和俄罗斯的索利卡姆斯克。

冰晶石主要形成于岩浆岩中，蕴藏于伟晶岩中。结晶体白色细小，无气味，溶解度比天然冰晶石大。冰晶石的晶体为立方体或者短柱形，双晶，也以块状、粒状的集合体出现；颜色多变，从无色、白色到棕色、红色；条痕呈白色，从透明到半透明，具有玻璃光泽或者油脂光泽。冰晶石在自然界产出稀少，通常由人工制造。可以作为炼铝的助溶剂；也用作研磨产品的耐磨添加剂；可以用作铁合金及沸腾钢的熔剂、有色金属熔剂、铸造的脱氧剂、玻璃抗反射涂层、搪瓷的乳化剂以及农

药的杀虫剂，所以有着很高的经济价值。

萤石的别名叫氟石，主要存在于炙热的矿脉中和温泉周围，无色透明的萤石晶体产于花岗伟晶岩或萤石脉的晶洞中，常常与石英、方解石、黄铁矿、重晶石等物质共生，萤石的主要成分为氧化钙，含杂质较多。萤石晶体属于等轴晶系，通常为立方体、八面体或立方体的穿插双晶，也以粒状、块状的集合体出现。在紫外线照射下或者加热时，萤石会出现紫蓝色的荧光，这也是它的命名由来。萤石的颜色多变，从浅绿、浅紫到无色，有时还会呈现出玫瑰红色；条痕呈白色，具有玻璃光泽，从透明到不透明。在冶金工业上，萤石可以用作助熔剂，还是制造氢氟酸的原料。萤石主要产地是南非、墨西哥、蒙古、俄罗斯、美国、泰国、西班牙等地。

第四章 氧化物和氢氧化物

氧元素为负二价时，会与另外一种化学元素结合在一起，形成氧化物。氧化物可形成许多种矿物，存在于多种地质环境中。氧化物矿石质地坚硬，比重较大。氢氧化物是氧化物和水反应之后的产物，硬度较之氧化物小一些，具有碱的特性，能与酸生成盐和水，与可溶的盐进行复分解反应，受热分解为氧化物和水。

第一节 尖晶石、红锌矿和赤铜矿

尖晶石是熔融的岩浆进入到含有杂质的灰岩或者白云岩中，然后经接触变质作用逐渐生成。尖晶石的晶体形态是八面体，有时也会出现立方体、菱形十二面体的聚集体，或者粒状、块状、致密状的集合体。尖晶体颜色丰富多彩，如无色、粉红色、红色、紫红色、浅紫色、蓝紫色、蓝色、黄色、褐色等；条痕呈白色，具有玻璃光泽，从透明到不透明。由于尖晶石有着绚丽的色彩，自古以来就被认定为最美丽的宝石，宝石级的尖晶石主要是指镁铝尖晶石，是一种镁铝氧化物。目前，世界上最具传奇色彩的“铁木尔红宝石”和1660 年被镶嵌在大英帝国国王王冠上的“黑色王子红宝石”都是尖晶石的典型代表。

红锌矿是重要的锌矿石，常与方解石、硅锌矿等物质一起共生于变质岩中，红锌矿的晶体是六方椎体，但非常罕见，主要是粒状、块状、致密状的集合体。颜色呈暗红色或橘黄色，从透明到半透明，具有半金属光泽。红锌矿是一种稀有矿石，只存在于德国的隆克林、美国的新泽西州等地，因此始终受到收藏家和矿物学家的关注和珍爱。

赤铜矿常与自然铜、孔雀石、褐铁矿等物质共生于铜矿床的氧化带中。赤铜矿的晶体为立方体、八面体、菱形十二面体，双晶现象罕见，主要是致密块状、粒状、土状的集合体。赤铜矿的新鲜表面是洋红色

的，氧化之后则是暗红色；条痕呈棕红色，具有金刚光泽或者半金属光泽。赤铜矿是一种红色的氧化物矿物质，其质软但极重。一般由铜的硫化物经风化后逐渐形成，即次生矿物。赤铜矿中的含铜量高达88.82%，但由于分布范围比较小，所以只能作为次要的铜矿石，法国、智利、玻利维亚等是赤铜矿的主要产地。

第二节 磁铁矿、钛铁矿和赤铁矿

磁铁矿是常见的氧化物，主要存在于岩浆岩中，也可存在于矿脉和交代矿床中。磁铁矿的单品晶体是八面体、菱形十二面体，还会以致密状、块状、粒状的集合体出现。颜色是铁黑色或具暗蓝靛色；条痕呈黑色，具有半金属光泽或者暗淡光泽，不透明。由于磁铁矿具有很强的磁性，所以能被永久磁铁吸引，因此又被称为磁石、玄石。磁铁矿不仅是炼铁的重要矿物原料，还是传统的中药材。广泛分布于全世界，瑞典的基鲁纳和智利的拉克铁矿是著名的磁铁矿产地，俄罗斯、美国、巴西、澳大利亚、中国等国家也拥有丰富的磁铁矿。

钛铁矿是铁和钛的氧化物矿物，也是许多岩浆中的副产物，如火成岩、变质岩等，还会出现在黑砂矿中。钛铁矿的晶体属于三方晶系，一般是板状的，有时也会以菱面体或者是块状、片状、粒状的集合体出现。颜色呈咖啡色或者铁黑色，不透明。钛铁矿是提取钛和二氧化钛的重要矿物。钛铁矿的主要产地是加拿大魁北克的埃拉德湖、挪威的克拉格罗、印度的特兰万科尔、美国的佛罗里达以及澳大利亚的东海岸等。

赤铁矿是一种铁的氧化物，作为广泛分布在各种岩石当中的副矿物，它常以分散的粒状存在于火成岩中。赤铁矿的晶体为菱面体或者板状，也会以片状、鳞片状、粒状、肾状、土状、致密块状的集合体出现。赤铁矿颜色多变，从铁黑色、钢灰色到暗红色，条痕呈樱红色；从金属光泽到半金属光泽，而且不透明。赤铁矿是经济价值较高的矿物之一，但只有极少数的赤铁矿才拥有完美的金属闪光菱面体，一般情况下晶体都呈扁平，也有一些板状成簇组合成玫瑰花的形状，又被称为“铁玫瑰”；还有一些呈鳞片状的集合体，被称为镜铁矿。赤铁矿是主要的铁矿

石矿物，不仅有着很高的使用价值，还有巨大的经济价值。赤铁矿的主要产地是美国的苏必利尔湖和克林顿、俄罗斯的克里沃伊洛格、巴西的迈拉斯格瑞斯等地。

第三节 红宝石和蓝宝石

红宝石主要形成于岩浆岩和变质岩中，还会出现在河床的沙砾层中。红宝石的晶体呈双锥形、板状、菱面状，还存在着块状和粒状，颜色是红色，条痕呈白色，从玻璃光泽到金属光泽，而且半透明。红宝石是极为珍贵的矿产资源，《圣经》中曾将它誉为所有宝石中最珍贵的，它炙热的红色总能让人联想到热情和爱情，所以被称为“爱情之石”，象征永恒的爱情和矢志不渝的真心。也有一些民族认为它是不死鸟的化身，由此衍生出许多美好的幻想。据说，左手戴一枚红宝石戒指，或者左胸戴一枚红宝石胸针，便拥有化敌为友的力量。

蓝宝石也存在于岩浆岩和变质岩中，还会出现在冲击矿床中，属于刚玉族矿物。蓝宝石晶体是三方晶系，板状，颜色是菱白色，具有玻璃光泽或者金属光泽，呈现半透明状。古波斯人认为蓝宝石反射的光彩可使天空呈现出蔚蓝色，因此认为它是德高望重的威望象征。蓝宝石是九月的诞生石，人们认为它蕴含的纯净和高雅的色调代表着慈祥、诚实、高尚。由于蓝宝石晶体晶莹剔透，又被赋予了神秘的超自然色彩，在西方人眼中，蓝宝石又有“灵魂宝石”之称。蓝宝石的诸多美好特征，使它成为人们最喜爱的宝石之一。

第四节 水镁石、褐铁矿和水锰矿

水镁石形成于变质石灰岩、蛇纹岩及片麻岩中，属于典型的低温热液蚀变矿物。水镁石的晶体是板状，主要是叶片状、纤维状、粒状的集合体。水镁石的颜色是白色、灰色或者浅蓝色，也会随混入物的含量，如含铁、锰等杂质后便会呈现出黄色或者褐红色；条痕呈白色，具有珍

珠光泽，而且是透明的。水镁石是提取镁的重要矿物，美国、法国、英国等都有丰富的水镁石资源。

褐铁矿指的不是一种矿物，而是针铁矿、水针铁矿等矿物的统称。由于这些矿物的颗粒非常细小，难以辨认，便统称为褐铁矿。褐铁矿不会形成晶体，主要是块状、结核状、钟乳状的集合体。晶体颜色通常是黄褐色和浅黑色，条痕是黄棕色，拥有半金属光泽或者玻璃光泽，而且是半透明或者不透明的。褐铁矿是氧化之后形成的普遍次生物质，在硫化矿床氧化带中常构成红色物质，这个特征可以帮助人们在寻找矿物时，与磁铁矿和赤铁矿做区隔。褐铁矿中铁的含量较低，但易于冶炼，所以是不可或缺的重要铁矿石资源之一。褐铁矿的主要产地是法国的洛林、德国的巴伐利亚以及瑞典等。

在氧化条件不是太充分的环境下，会形成水锰矿，它是碱性的锰氧化物矿物，在低温热液矿脉中的状态是金属或者重晶石，常常与方结石共生，还可能出现在湖泊、沼泽之中。水锰矿的晶体是柱状，柱面有纵纹，一般是双晶，还会以块状、纤维状、粒状、结核状的集合体出现，颜色是深灰色或者黑色；条痕的颜色是红棕色或者黑色，具有半金属光泽，而且不透明。水锰矿的主要产地是英国的考恩沃、美国的克劳里德、德国的哈斯山脉和加拿大等。

第五章 碳酸盐、硝酸盐、硼酸盐

碳酸盐是金属元素、非金属元素与碳酸根结合而成的化合物，如方解石。硝酸盐是金属元素与硝酸根结合而成的化合物，如钠硝石。硼酸盐是金属元素与硼酸根结合而成的化合物，如钠钙解石。

第一节 文石、方解石和白云石

文石又称为霰石，它的矿藏量比方解石的储量要少一些，主要形成于变质岩和沉积岩中，也会存在于一些动物的贝壳或者骨骸中，海水中和温泉周围的沉积物中亦有产出。文石的晶体是柱形，通常是双晶，如果双晶是交错而生，则呈六方体，一般以柱状、钟乳状、纤维状的集合体产出；颜色为白色、无色、灰色、绿色、蓝色等多种；条痕呈白色，从透明到半透明，具有玻璃光泽或者油脂光泽。文石在世界上的主要产地是美国的加利福尼亚州。

方解石是一种广泛分布的矿物，是组成石灰岩和大理石岩的重要成分，主要形成于石灰岩中，在溶液中溶解的重碳酸钙遇合适的条件也能沉淀生成方解石。方解石的晶体形状多样，通常是菱面体或者三角面体，双晶，主要以粒状、块状、钟乳状、纤维状及晶簇状的集合体出现；颜色从无色到白色、红色、绿色、黑色等多种，其中无色透明的晶体叫作冰洲石；透明到半透明，具有玻璃光泽或者珍珠光泽。方解石在冶金工业上可以制作成溶剂，在建筑工业上可以生成水泥、石灰。冰洲石是制作偏光棱镜的高级材料，方解石有着广泛的实用性。

白云石是白云岩和白云质灰岩的重要矿物成分，主要形成于炙热的矿脉或者富含镁的变质岩中，也产于结晶石灰岩和碳酸盐岩石的孔穴内，有时作为各种沉积岩的胶结物，为碳酸盐岩中最常见的一种造岩矿物。白云石的晶体结构和方解石的晶体结构相似，通常是菱面体，晶面

弯曲呈马蹄状，主要以块状、粒状集合体出现。纯净的白云石的颜色是白色的，含其他杂质时会呈灰色、粉红色或者棕色；条痕呈白色，从透明到半透明，具有玻璃光泽或者珍珠光泽。白云石实用性强，广泛应用于建筑、化工、农业、环保、节能等各个领域，主要用来制作高炉炼铁的火熔剂和碱性、耐火材料。此外，还可用于生产钙镁磷肥、制造硫酸镁。

第二节 孔雀石、蓝铜矿、钠硝石

孔雀石是一种含有铜元素的碳酸盐矿物，主要形成于铜矿床的氧化带中，常与蓝铜矿等物质共生。孔雀石属于单斜晶系，晶体呈柱状或针状，一般是双晶，主要以隐晶钟乳状、块状、皮壳状、结核状、纤维状的集合体出现；颜色为绿色、孔雀绿或暗绿色；条痕呈淡绿色，具有丝绢光泽或玻璃光泽，从半透明到不透明。孔雀石是不透明深绿色，并且带有色彩浓郁的条状花纹，这一独有特质是其他宝石所不具备的，所以几乎不会出现仿冒品；孔雀石可用来雕刻鸡心吊坠、蛋形戒面、项链，还可制成印章料。孔雀石的应用最早可追溯到4000年前，古埃及人开采了苏伊士和西奈之间的矿山，将孔雀石制成护身符为儿童佩戴，以祛除邪恶的灵魂；德国也有人认为佩戴孔雀石可以避免死亡的威胁。在地质勘探中，孔雀石还可以作为寻找黄铜矿的标志物，地质工作者在野外寻矿时，只要发现了孔雀石，便能发现黄铜矿。孔雀石的主要产地是俄罗斯、罗马尼亚、巴西等。

蓝铜矿又称为石青，主要形成于铜矿床的氧化带，在铁帽及近矿围岩的缝隙中也可见。蓝铜矿常与孔雀石等物质共生，是含铜硫化物氧化的次生矿物。蓝铜矿的晶体为板状或短柱状，不仅可以结为双晶，还会以块状、钟乳状、结核状的集合体出现；颜色为深蓝色，断口呈贝壳状；条痕颜色呈浅蓝色，从透明到不透明，具有玻璃光泽或者暗淡光泽。蓝铜矿大量产出时可作为铜矿石利用；质纯色美的蓝铜矿可作为制作工艺品的原材料，碾成粉后则可制作天然蓝色颜料。此外，蓝铜矿还可以制成保健品，有增强身体敏感度，让人头脑清醒的功效；还能够减轻喉痛、沙哑及喉炎等病症，排除精神障碍。

钠硝石主要由硝化细菌分解腐败的有机物之后形成的硝酸根与土壤中的钠质化合后生成，钠硝石常与石膏、芒硝、石盐等物质共生，但很容易被水溶解而流失，所以钠硝石通常富集在干燥炎热的沙漠中。在智利北方的沙漠中，有长达720 多千米的钠硝石矿床，因此又有“智利硝石”之称。钠硝石的晶体与方解石类似，为菱面体，但不常见，主要是以块状、粒状、盐华状的集合体出现；纯净的钠硝石呈无色或白色，含杂质后呈黄色、灰色或棕色，淡褐或红褐色，条痕为白色，具有玻璃光泽，而且透明。钠硝石主要用于制造氮肥、硝酸、炸药和其他氮素化合物；还可以用作冶炼镍的氧化剂或人造珍珠的黏合剂等，有着巨大的使用价值。

第三节 硬硼酸钙石、钠硼解石、四水硼砂

硬硼酸钙石主要形成于蒸发盐矿床中，晶体呈短柱状，主要以块状、球状、粒状的集合体出现。颜色为白色、黄色或者灰色，条痕呈白色，从透明到半透明，具有玻璃光泽。硬硼酸钙石易为硝酸溶解，而且易断，燃烧时会产生绿色火焰。

钠硼解石是干旱地区内陆湖化学沉积物的典型代表，常与石盐、芒硝、石膏、天然碱、钠硝石以及硼砂、硼镁石、水方硼石、库水硼镁石、镁石等物质共生于蒸发岩盆地中。钠硼解石的晶体是针状，主要以针状、纤维状、白色绢丝状、块状、放射状的集合体出现；颜色是白色或者无色，条痕呈白色，从透明到半透明，具有玻璃光泽。钠硼解石在工业上有着重要用途，也是提炼工业硼的重要矿物。

四水硼砂是一种含有一定水分的硼酸钠矿物，与硼砂的成分相似，只是水的含量少一些，主要形成于蒸发岩矿床和矿脉中。四水硼砂的晶体是短柱形，极罕见，常以块状集合体出现，颜色是无色或白色，条痕呈白色，从透明到不透明，具有玻璃光泽或者暗淡光泽。人类发现四水硼砂的时间比较晚，1926 年才在加利福尼亚波隆镇附近的莫哈维沙漠地下勘探出来。

第六章 硫酸盐、铬酸盐、钼酸盐和钨酸盐

硫酸盐是金属元素与硫酸根结合而形成的化合物，如石膏；铬酸盐是金属元素与铬酸根结合而形成的化合物，如铬铅矿；钼酸盐是金属元素与钼酸根结合而形成的化合物，如钼酸矿；钨酸盐是金属元素与钨酸根结合而形成的化合物，如白钨矿。

第一节 石膏、天青石和硬石膏

石膏是化学沉积作用下产生的物质，常形成巨大矿层或透镜体，常与硬石膏、石盐等物质共生于石灰岩、页岩、砂岩、泥灰岩及黏土岩中。石膏的晶体是板状、金刚石状，双晶，最常见的是以粒状、块体或者纤维状产出。颜色多样，从无色、白色到灰色、浅黄色、浅红色，条痕呈白色，从透明到不透明，具有玻璃光泽或者暗淡光泽。石膏应用广泛，不仅可以制造水泥，也是重要的化工原料；在医学上也有一定用途，如解肌清热、除烦止咳等，还可以治疗汤火造成的烫伤。

天青石常与方解石、石英等物质共生于炙热的矿脉中，也会出现在沉积岩或蒸发岩和基性岩的矿床中。天青石的晶体是板状或柱状，大部分是以块状、纤维状的集合体出现。颜色多样，从无色、白色到浅红色、棕色，条痕呈白色，从透明到半透明，具有玻璃光泽。天青石是地球上的稀有矿物，全世界的已知储量仅有2　亿吨，由于它是提取锶的重要矿物原料之一，所以显得尤为珍贵，开发价值极高。

硬石膏是一种天然硫酸盐矿物，主要成分是无水硫酸钙，广泛分布在蒸发作用形成的盐湖沉积物中，与白云石、石膏、石盐等蒸发岩等矿物共生，还会出现在炙热的矿脉中。硬石膏的晶体是板状、柱状，但主要是以粒状、纤维状的集合体产出。纯净的硬石膏的颜色是无色或白

色，若含其他杂质会呈灰色、浅灰、浅红色、浅棕色，条痕的颜色是白色，从透明到不透明，具有玻璃光泽或者珍珠光泽。

第二节 重晶石、胆矾、明矾石

重晶石是钡的最常见矿物，也是一种非金属矿物，它的主要成分是硫酸钡，常与石英、方解石、萤石、黄铁矿、白云石、黄铜矿等物质共生于炙热的矿脉中，也会形成于沉积岩层或者温泉周围。重晶石的晶体为板状、柱状，常常会结合成较大的晶体，也能形成一些细小的玫瑰状结核，主要以粒状、片状、纤维状、柱状的集合体出现。纯净的重晶石的颜色是白色，有一定光泽，但含有杂质之后的颜色则呈灰色、浅红色、浅黄色，条痕的颜色是白色，从透明到半透明，具有玻璃光泽或者珍珠光泽。重晶石是一种极为重要的非金属矿物，在工业上有着广泛用途，不仅可以作为造纸工业、橡胶工业、塑料工业的填合剂，还可以作为钻井泥浆的加重剂，也可作锌钡白颜料；在生活方面，重晶石是道路建设的极好材料之一（橡胶和含10% 重晶石的柏油混合物，就是一种优良的铺路材料，耐磨性非常好）。此外，目前，重晶石还被用来填充在重型道路建设设备的轮胎中，增加重量，方便夯实路面填方地区。

胆矾属于硫酸盐类矿物的晶体，或是人工制成的含水硫酸铜，主要形成于硫化铜矿的氧化带中。胆矾的晶体为板状、柱状，主要以粒状、片状、纤维状、皮壳状的集合体出现。颜色多样，从天蓝色到深蓝色或浅绿色，条痕无色，透明至半透明，具玻璃和油脂光泽。胆矾在药理上具重要作用，能与蛋白质结合形成不溶性的蛋白质化合物，溶液具有收敛致泌的作用，内服后会引发反射性呕吐，这个特征被医生利用，以帮助病人催吐或解毒。

明矾是一种分布广泛的硫酸盐矿物，主要形成于流纹岩、粗面岩、安山岩等火山岩中，是中酸性火山喷出岩经过低温热液作用生面的蚀变产物。明矾石的晶体是菱面体，属三方晶系，主要以块状、纤维状、致密状的集合体出现。颜色为白色到浅红色、浅黄色或棕色，条痕呈白色，从透明到几乎不透明，具有玻璃光泽或珍珠光泽。明矾石可以用来

提取明矾和硫酸铝，工业上还可以用来炼铝，制造钾肥和硫酸。

第三节 杂卤石和青铅矿、绒铜矿

杂卤石是一种可溶性钾盐矿物、硫酸盐矿物，常与石盐、硬石膏等矿物共生于蒸发岩沉积中，但很少出现在火山周围。杂卤石的晶体为细小的长板状，但很难形成，主要以纤维状、叶块状的集合体出现。纯净的杂卤石是无色、白色或灰色的，当含有氧化铁之后就会转变为粉红色，条痕呈白色，从透明到半透明，具有松枝光泽或玻璃光泽。杂卤石可以用来制造化肥。

青铅矿主要在与流动液体接触的铅、铜矿脉中形成，是次生矿物，常与硫酸铅矿、水胆矾、胆矾等物质共生。青铅矿的晶体为柱状、板状，主要是双晶，有时也会出现晶簇；颜色为青蓝色，断口呈贝壳状，条痕呈浅蓝色，从半透明到透明，具有玻璃光泽或半金刚光泽。青铅矿的主要产地是阿根廷、澳大利亚、加拿大、纳米比亚、俄罗斯、西班牙、意大利、美国等。

绒铜矿主要形成于矿石脉中，特别是铜矿的氧化带中含大量的绒铜矿。绒铜矿的晶体为细小的针状，主要以簇状的集合体出现，也有皮壳状、纤维状细脉；颜色从浅蓝色到深蓝色，断口参差不齐，条痕呈浅蓝色，具有丝绢光泽且是半透明的。

第四节 铬铅矿和钼铅矿

铬铅矿形成于含有铬和铅的矿脉或矿床的蚀变带、氧化带中，常与钼铅矿、白铅矿、磷氯铅矿等矿物共生。铬铅矿的晶体为细长柱状，主要是块状的集合体。铬铅矿的颜色是橘红色，如果含杂质则呈现出橘黄色、红色或黄色，断口呈亚贝壳状，条痕颜色为黄色，具有金刚光泽或者玻璃光泽，半透明。铬铅矿易在火焰中熔化，也可以溶解在强酸中，

因此利用强酸可以将矿物中的铬铅矿提取出来。铬铅矿是铬酸铅矿物，是最早发现元素铬的矿物。铬可以用来镀在金属表面防锈，又由于颜色鲜艳，铬铅矿还被当作颜料。

钼铅矿是一种铅钼酸盐矿物，主要成分是钨、钒、钙和稀土元素等物质，又被称为彩钼铅矿，主要形成于矿床循环流体作用的氧化带中，常与白铅矿、褐铁矿、方铅矿、孔雀石等物质共生。钼铅矿的晶体为四方晶系，呈现出板状、柱状，有时也会出现双椎状，主要以块状、粒状的集合体出现。纯净的钼铅矿的颜色从稻草黄到蜡黄，当含有钨时会呈橘红色或褐色，断口为亚贝壳状，条痕颜色从白色到浅黄色，具有松枝光泽或金刚光泽，从透明到半透明。钼铅矿并非钼矿的主要来源，只是因为它鲜艳的色彩和光泽，所以受到全世界收藏家的喜爱。钼铅矿的主要产地有捷克、摩洛哥、阿尔及利亚、澳大利亚、墨西哥的本内特、美国的亚利桑那州等。

第五节 黑钨矿和白钨矿

黑钨矿是钨锰矿系列的过流矿物，常与锡石、毒砂等物质共生于花岗伟晶岩的石英矿脉中。黑钨矿的晶体为柱状、板状，通常是双晶，主要是块状的集合体。颜色会随着铁、锰的含量不同发生相应变化，颜色越深表示含铁量越多，从褐红色到黑色，条痕颜色从黄褐色到黑褐色，具有金属光泽或者半金属光泽，从半透明到不透明。黑钨矿的熔点高，熔化速度非常慢，是提炼钨的重要矿物之一。俄罗斯的西伯利亚、缅甸、泰国、澳大利亚、玻利维亚等地是黑钨矿的主要产地。

白钨矿是一种无酸盐矿物，属四方晶系，外表是粒状石块，在紫外线的照射下，或者加热之后呈紫色。白钨矿也是提炼钨的重要矿物，常与黑钨矿形成于接触变质岩和伟晶岩中，还会出现在砂积矿床中。白钨矿的晶体为假八面体或四方双锥，主要以粒状、致密块状、块状的集合体出现；颜色是无色或白色，有时也会伴随着灰白色、浅黄色、褐色、绿色等颜色，条痕呈白色，具有玻璃光泽或金刚光泽。受短波紫外线照射后的白钨矿会呈蓝白荧光，易溶解于酸溶液，这是对白钨矿进行鉴定

的主要依据。朝鲜南部的山塘、德国的萨克森、英国的康沃尔、澳大利亚的新南威尔士、玻利维亚北部、美国的内华达州等都是白钨矿的主要产地。

第七章 磷酸盐、砷酸盐、钒酸盐

磷酸盐、砷酸盐、钒酸盐是金属元素分别与磷酸根、砷酸根、钒酸根结合在一起而形成的化合物，这类矿物主要是由原生硫化物氧化而成，性质多样，颜色各异，质地比较软，而且很容易破碎。

第一节 天蓝石、蓝铁矿和独居石

天蓝石是一种含有氢基的碱性磷酸铝镁矿物，主要形成于多种地质环境中，如石英矿脉、花岗伟晶岩、变质岩等。常与红柱石、金红石等矿物共生，变质伴生矿物包括石英、石榴子石、蓝晶石、白云母、叶蜡石、刚玉等。天蓝石的晶体为双锥状，还会出现板状，体积较大，常为双晶，主要以块状、粒状、致密状的集合体出现；颜色有蓝色、浅蓝色、蓝绿色等，断口为参差状，条痕呈白色，具有玻璃光泽或者暗淡光泽，从半透明到不透明。天蓝石是一种可以媲美青金石的高档宝石，又被称为“假青金石”。印度的巴汉达拉、美国的新罕布什尔州和加州、巴西的米纳斯吉拉斯、安哥拉、瑞典、马达加斯加和奥地利等都是天蓝石的主要产地。

蓝铁矿是一种含水磷酸盐类矿物，主要形成于铁矿床和锰矿床的氧化带中。蓝铁矿的晶体为长柱状、板状，主要是以块状，片状、纤维状的集合体出现。纯净的蓝铁矿是无色的，风化之后颜色变深，断口为参差状，条痕的颜色从无色到蓝白色，具有玻璃光泽或者珍珠光泽，从透明到半透明。蓝铁矿易溶于盐酸，因蓝铁矿的硬度较低，且非常清脆，所以只适于收藏。此外，它可以作为绿松石和蓝铁方柱石的着色剂。玻利维亚、喀麦隆、美国的爱达荷州列姆希科、加拿大、澳大利亚、日本和俄罗斯等是世界蓝铁矿的主要产地。

独居石是包括独居石铈、独居石榴以及独居石钕等矿物在内的一个

矿物系列，具放射性。作为副矿物，独居石主要形成于伟晶岩和变质岩的矿脉中，地质学家曾在伟晶岩中发现重量达几千克的特大独居石晶体。此外，砂积矿床，如河流或者滩地砂层也有独居石产出。独居石的晶体很小，通常是板状、柱状，双晶，表面很粗糙且有许多条纹，主要以粒状的集合体出现；颜色多样，有棕色、红棕色、黄棕色、粉红色、黄色、浅绿色、白色等，断口是贝壳状或者参差状，条痕呈白色，具有松脂光泽、蜡质光泽或者玻璃光泽，从透明到半透明。巴西、印度、斯里兰卡、澳大利亚、南非和中国等都是独居石的主要产地。

第二节 绿松石、银星石和磷灰石

绿松石，别名“土耳其玉”，由富含大量铝的岩浆岩或者沉积岩经过分化形成。绿松石基本不会形成晶体，但有时会出现短小的柱状晶体，主要以块状、粒状、钟乳状、结核状、皮壳状、细脉状的集合体出现。绿松石的颜色包括蓝色、绿色、灰色等，断口是贝壳状，条痕呈白色、浅绿色，具有蜡烛光泽或者暗淡光泽，从透明到不透明。绿松石属于优质的玉石材料，被国际珠宝界分为四个品级，一级品为波斯级，二级品为美洲级，三级品是埃及级，四级品是阿富汗级，其中以一级品为最优质的绿松石。

银星石是一种次生矿物，主要形成于岩石的缝隙中。银星石也很难形成晶体，只会形成细小的柱状晶体，主要以放射状、针状、皮壳状、球状的集合体出现；颜色包括白色、黄色、黄棕色，断口是亚贝壳状或参差状，条痕呈白色，具有玻璃光泽、松脂光泽或珍珠光泽，从透明到半透明。银星石被应用到医药领域，可以用来治疗吐血、咯血等症状。银星石的主要产地是英国和美国。

磷灰石主要形成于岩浆岩或者变质石灰岩中，磷灰石的晶体是柱状、板状，主要以块状、致密状、粒状的集合体出现；颜色一般是绿色，有时也会出现无色、白色、黄色、浅红色、棕色、灰色、紫色等，断口为贝壳状或参差状，条痕呈白色，具有玻璃光泽或松脂光泽，从透明到半透明。磷灰石是提取制造磷肥和提取磷及其他化合物的主要原料

之一。另外，磷灰石晶体的色泽透明而润美，具有一定的收藏价值，俄罗斯是著名的磷灰石产地。

第三节 水砷锌矿、光线矿和钴华

水砷锌矿常与方解石、褐铁矿、孔雀石、蓝铜矿等矿物一起共生于矿脉的氧化带中，水砷锌矿的晶体是长板状等径状，双晶，主要是球状的块体。水砷锌矿的颜色是黄绿色，断口为亚贝壳状或参差状，条痕呈白色，具有玻璃光泽，从透明到半透明。

光线矿是次生矿物，主要存在于硫化铜矿床的氧化带中，常与橄榄铜矿等矿物伴生。光线矿的晶体是扁长的板状、菱面体状，也会以蔷薇花状的集合体出现，而内部是反射状的；颜色从蓝绿色到黑绿色，断口为参差状，条痕的颜色是蓝绿色，具有玻璃光泽或者珍珠光泽，从透明到半透明。

钴华是一种含水砷酸钴，也属于次生矿物，主要形成于钴矿脉的氧化带中。钴华的晶体是柱状、针状，晶体表面布满了条纹，常以土状块体、叶片状的集合体出现。颜色从深紫色到粉红色，断口为参差状，条痕呈淡红色，具有金刚光泽、玻璃光泽或珍珠光泽，从透明到半透明。钴华主要用来提炼钴，也可以作为玻璃和陶瓷的染色剂。此外，钴华还是寻找自然银矿的标志，地质学家可以按地表的钴华寻找到其他矿物或者伴生银。

第四节 砷铅矿和橄榄铜矿、臭葱石

砷铅矿常与磷氯铅矿、钒铅矿、方铅矿、硫酸铅矿、异极矿、毒砂等物质共生于铅矿床的氧化带中，砷铅矿的晶体是针状、圆筒状、细长的柱状，还会出现葡萄状、颗粒状的集合体；颜色多样，包括黄色、橙色、棕色、白色、无色、浅绿色等，断口为亚贝壳状或参差状，条痕呈

白色，具有玻璃光泽或松脂光泽，从透明到半透明。砷铅矿易溶于盐酸，也能在火焰中熔化，并散发出强烈如大蒜的味道。砷铅矿是冶炼铅的重要矿物之一。

橄榄铜矿常与孔雀石、蓝铜矿、方解石、透视石、臭葱石等矿物共生于硫化铜矿床的氧化带中。橄榄铜矿的晶体是柱状、针状、板状，也有球状、肾状的块体出现；颜色包括橄榄绿、棕色、浅黄色、灰色或白色，断口是贝壳状或参差状，条痕呈白色，具有玻璃光泽或者丝绢光泽，从半透明到不透明。橄榄铜矿易溶于酸溶液，加热之后会散发出与大蒜相似的味道。

臭葱石是一种罕见的砷酸盐矿物，主要形成于含有砷矿的外层氧化带中，也会在温泉外围呈壳层状沉淀。臭葱石的晶体为双锥状、柱状、板状，主要是以块状、土状的集合体出现；颜色多样，包括绿色、蓝色、棕色、无色、紫罗兰色等，断口为亚贝壳状，条痕呈白色，具有玻璃光泽、松脂光泽或暗淡光泽，从透明到半透明。臭葱石易溶于盐酸和硝酸，加热之后散发出大蒜的气味，如果在封闭的空间内被加热，会释放水分。墨西哥、希腊、巴西、英国和美国的加州、安大略湖等是臭葱石的主要产地。

第五节 钒钾铀矿、钒铜矿和钒铅矿

钒钾铀矿也被称为“钒酸钾铀矿”，属于次生矿物，主要分布在有机质沉积岩的风化带或沉积铀矿床的氧化带中。钒钾铀矿的晶体微小且扁平，主要以粉状、微晶块状、皮壳状的集合体出现；颜色为鲜红色、绿黄色，断口为参差状，条痕呈黄色，晶体具有珍珠光泽，块体具有暗淡光泽，而且是半透明的。钒钾铀矿具很强放射性，易溶于酸溶液。纯净的钒钾铀矿中含有的铀大约是53%，钒的比重约为12%，是提取铀、钒及镭的矿物原料。

钒铜矿是其他铜矿发生变化而形成的产物，晶体是皮壳鳞片状，通常具有三角形或者六边形的轮廓，双晶，一般是片状，还会以玫瑰状、

蜂窝状的集合体出现；颜色是绿色、黄色、棕色，断口为参差状，条痕呈黄绿色，具有玻璃光泽或珍珠光泽，而且是半透明的。钒铜矿易溶于酸溶液。

钒铅矿是一种不常见的矿物，只能从一个已经存在的矿物通过化学变化来形成，所以它是一种次生矿物。钒铅矿的晶体结构类似于磷灰石的晶体结构，自然环境下，主要形成于铅矿床的氧化带中；在干旱条件的地区，钒铅矿由原生铅矿石氧化形成。钒铅矿有时可以形成空心的柱状晶体，颜色包括鲜红色、红色、棕红色、黄色，断口是贝壳状或参差状，条痕呈白色或浅黄色，具有松脂光泽或半金刚光泽，从透明到半透明。钒铅矿可以在火焰中熔化，也易溶于酸溶液；蒸发之后会留下红色的沉淀，而其他钒酸类矿物则是形成白色沉淀。钒铅矿是提炼钒的主要矿物，也是提炼铅的次要矿物。此外，由于钒铅矿色彩绚丽，有光泽，成为许多矿物收藏家关注的目标。钒铅矿的主要产地是美国的新墨西哥州、加州和亚利桑那州，还有阿根廷、南非、奥地利、英国和摩洛哥等，矿藏分布范围广，全世界超过400 座矿井中出现过它的身影。

第八章 硅酸盐

硅酸盐是金属元素（主要是铝、铁、镁、钾、钠等）与硅、氧结合在一起形成的化合物的总称。硅酸盐矿物中最丰富、体积最大的一类，在地壳中广泛分布，是构成多数岩石，如花岗岩等，以及土壤的主要成分。原生硅酸盐也是构成岩浆岩和变质岩的主要矿物成分。

第一节 橄榄石、硅镁石类和黄玉

橄榄石是八月份的诞生石，又被称为“黄昏的祖母绿”，象征着夫妻幸福。橄榄石分为镁橄榄石和铁橄榄石，前者含大量镁元素，主要形成于基性、超基性岩以及大理岩中；后者则含大量铁元素，常形成于快速冷却的酸性岩石中。橄榄石的晶体是厚板状，晶体末端是楔性，常以块状、致密状、粒状的集合体出现；颜色多样，从绿色、黄棕色到棕色、白色，断口为贝壳状，条痕呈无色，具有玻璃光泽，从透明到半透明。橄榄石易溶于酸溶液，并出现凝胶现象。橄榄石是一种著名的宝石，埃及人相信它拥有太阳的光明和力量，将其奉为“太阳的宝石”，佩戴它可以消除对夜间的恐惧。在美国的夏威夷，人们将橄榄石誉为“火神的眼泪”。橄榄石的主要产地是缅甸、美国等。

硅镁石类是一种硅酸盐矿物，它的晶体属于正交晶系的岛状结构，包括硅镁石、斜硅镁石、块硅镁石、粉硅镁石等矿物。主要形成于接触变质石灰岩或某些矿脉中，常与方解石、石墨、结晶石、石榴子石的矿物伴生。硅镁石的晶体非常小，又短又粗，主要是多种形状的集合体；颜色多样，从白色、黄色到橙色、棕色，断口为参差状，条痕呈棕色，具有玻璃光泽，从透明到半透明。硅镁石的主要产地是意大利的蒙特索马、芬兰的巴拉古斯、瑞典的卡韦尔托普等。

黄玉是一种含水硅酸盐矿物，主要形成于伟晶岩花岗岩矿脉的缝隙

中，常与石英等矿物共生。黄玉的晶体通常呈完美的柱状，有一些的重量可达100　　千克，有时也以块状、粒状、柱状的集合体出现；颜色多样，包括白色、红色、灰色、黄色、绿色、紫色、粉红色等，断口为亚贝壳状，条痕呈无色，具有玻璃光泽，从透明到半透明。黄玉在阳光下长时间暴晒会发生褪色。黄玉可作为研磨材料，也可作仪表轴承。透明漂亮的黄玉属于名贵玉石。黄玉不能溶解于酸溶液，也不能熔于火，这是鉴定黄玉的主要特征。黄玉在世界储藏量大，最著名的产地是巴西的米纳斯吉拉斯州，这里的黄玉色彩丰富，包括黄色、深雪梨黄色、粉红色、蓝色、粉红色及无色等。斯里兰卡是黄玉的重要产地，此外，美国的加利福尼亚州也有黄玉矿藏。

第二节 十字石、硬绿泥石和红柱石

十字石是岛状结构的硅酸盐矿物，主要形成于富含铁和铝质的泥质岩石的变质岩中，如云母、片岩、纤枚岩、片麻岩等，因有一个奇特的十字外形而得名，常与蓝晶石、白云母、石榴子石等矿物共生。十字石的晶体是短柱状，横断面呈现出菱形，双晶；颜色为棕色、黄色或黑色，断口是贝壳状或参差状，条痕颜色从红色到深灰色，具有玻璃光泽或者松脂光泽，从半透明到不透明。透明的十字石可作为宝石，具有很高的矿物学和岩石学意义。

硬绿泥石常形成于含铁、铝比较高的变质泥岩中，是这种岩石中的常见矿物，与白云母、绿泥石、石榴子石、蓝晶石等矿物共生。硬绿泥石的晶体是板状，但很少见，一般为双晶，主要以片状、块状或鳞片、玫瑰花状的集合体出现；颜色从深灰色到黑绿色，断口是层参差状，条痕的颜色从无色到淡绿色，具有珍珠光泽，而且是半透明的。因硬绿泥石的硬度比较高，常被用来制作砚石，瑞典是硬绿泥石最著名的产地。

红柱石是主要形成于花岗岩、伟晶岩等变质岩中的一种硅酸盐矿物，常与蓝晶石、刚玉等矿物共生。红柱石的晶体是柱状，也以块状、纤维状的集合体出现；颜色包括粉红色、浅红色、浅白色、浅绿色等，断口为亚贝壳状或参差状，条痕呈无色，具有玻璃光泽，从透明到不透

明。红柱石是现在已知的最优质的耐火材料之一，不仅应用到冶炼工业的高级耐火材料和技术陶瓷工业中的原料中，还可用于冶炼高强度的轻质硅铝合金。红柱石的主要产地是西班牙的安达卢西亚、奥地利的迪罗尔州、巴西的米纳斯吉拉斯等。

第三节 蓝晶石、蓝线石和蓝柱石

蓝晶石是一种岛状结构硅酸盐矿，与红柱石、矽线石构成同质多象变体，通常形成于变质岩中，如片岩、片麻岩等。蓝晶石的晶体是柱状、片状，而且常是弯曲的晶体，还会以块状、前卫状的集合体出现；颜色多样，包括蓝色、白色、灰色、绿色、黄色、黑色等，断口为参差状，条痕无色，具有玻璃光泽或珍珠光泽，从透明到半透明。蓝晶石属于高铝矿物，是优质的耐火材料之一，抗化学腐蚀性能强，热震机械强度大，受热膨胀不可逆，是生产不定型材料和电炉顶砖、磷酸盐不烧砖、莫来石砖等主要原料。蓝晶石还是一种变质矿物，其变质相由绿片岩相到角闪岩相，也常用作宝石戒面、手链和项链。蓝晶石的主要产地是美国的加利福尼亚州、爱荷华州、佐治亚州及加拿大、爱尔兰、法国、意大利、瑞士、印度、巴西、朝鲜、澳大利亚等。

蓝线石也是岛状硅酸盐矿物，主要形成于富含铝的变质岩或者伟晶岩中。蓝线石的晶体是柱状，但很少见，最常见的是片状、纤维状、放射状的集合体；颜色包括蓝色、紫罗兰色、粉红色、棕色，断口是参差状，条痕呈白色，具有玻璃光泽至暗淡光泽，从透明到半透明。蓝线石在工业上可以用来制作工业熔炉的内层。蓝线石的主要产地是加拿大、法国、意大利、马达加斯加、纳米比亚、挪威、波兰、斯里兰卡和美国的亚利桑那州、加州、科罗拉多州等。

蓝柱石是一种主要形成于伟晶岩、冲积砂矿床中的硅酸盐矿物。蓝柱石的晶体是柱状，颜色为无色、蓝色、白色，断口为贝壳状，条痕呈白色，具有玻璃光泽，从透明到半透明。除了用于制作宝石，蓝柱石还可以用来提取铍。蓝柱石最重要的产地是巴西的米纳斯吉拉斯，此外，加拿大的卡尔加里狄沃、俄罗斯的乌拉尔萨冈耶卡河、坦桑尼亚的莫罗

哥罗、德国的巴伐利亚、匈牙利、克什米尔等地也是蓝柱石的重要产地。

第四节 异极矿、符山石和绿柱石

异极矿通常是闪锌矿氧化之后的产物，主要形成于铅锌硫化物矿床的氧化带中，常与菱锌矿、白铅矿、褐铁矿、方解石、硫酸铝等矿物共生。异极矿的晶体为薄板状，表面有纵向条纹，还以块状、致密状、葡萄状、粒状、纤维状、皮壳状的集合体出现；颜色多样，包括白色、无色、蓝色、灰色、棕色，断口是贝壳状或参差状，条痕呈无色，具有玻璃光泽或者丝绢光泽，从透明到半透明。由于异极矿有着巨大的能量，而且能够以稳定平和的方式释放出来，因此常在医疗保健中应用，人们将其作为配饰佩戴之后，可以让心情变得平静。异极矿与菱锌矿相似，存在的区别是异极矿遇酸不会起泡。最著名的异极矿的产地是英国。

符山石也是岛状结构的硅酸盐矿物，主要形成于接触蚀变的石灰岩和某些岩浆岩中，常与绿帘石、石榴子石、方结石等矿物共生。符山石的晶体属于四方晶系，常呈四方体和四方锥形，晶体表面有纵纹，还会以柱状、放射状、致密块状的集合体出现；颜色包括黄色、灰色、绿色、褐色，断口是贝壳状或参差状，具玻璃光泽，从透明到半透明。晶莹剔透、色泽艳丽的符山石是一种优质的宝石，巴基斯坦、挪威、美国等地都有这种矿物，其中美国的加利福尼亚出产的绿色、绿黄色致密块状符山石，因质地细腻，有“加州玉”的美称。

绿柱石是环状结构的硅酸盐矿物，属于六方晶系，主要形成于伟晶岩或花岗岩中，还会出现在一些变质岩中。绿柱石的晶体是六方体，晶体表面有纵纹，以晶簇或针状集合体出现，有时会形成伟晶，长度可到5 米，重达18 吨。颜色通常是浅绿色，但若含有铯时，会呈粉红色，被称为“玫瑰绿柱石”；若含有铬时，会呈翠绿色，也就是俗称的“祖母绿”；若含有二价铁时，会呈淡蓝色，被称为“海蓝宝石”；含有三价铁时，会呈黄色，称为“黄绿宝石”。断口为贝壳状或参差状，条痕呈白色，具玻璃光泽，从透明到透明。绿柱石也是冶炼铍的重要原料之一，

色泽美丽的绿柱石为珍贵的宝石，具有很高的收藏价值。

第五节 电气石、黑柱石和斧石

电气石的别称是“碧玺”，是一种含硼的环状结构硅酸盐矿物，通常形成于花岗岩、伟晶岩以及一些变质岩中，常与绿柱石、石英等矿物共生。电气石的晶体为柱状，晶体表面有纵纹，横断面呈球面三角形，主要以棒状、放射状、束针状等集合体出现，偶尔也以致密块状出现。电气石类有七个品种，分别是锂电气石、铁电气石、钠铁电气石、镁电气石、红电气石、铬镁电气石以及钙镁电气石，断口为贝壳状或参差状，条痕呈无色，具玻璃光泽，从透明到不透明。电气石中含多种人体必需的天然矿物质，而且由于电气石本身拥有微弱的电流，因此蕴含的矿物质很容易为人体所吸收，成为人类补充矿物质的上佳来源。

黑柱石主要形成于岩浆或者熔岩的接触变质带中，还会出现在正长岩中。黑柱石的晶体是柱状晶体，表面有金刚石形的横截面和条纹，还会以块状、致密状的集合体出现，颜色为黑色或灰色，断口为参差状，条痕呈黑色、绿色和棕色，具半金属光泽，而且是不透明的。黑柱石易溶于盐酸，并有凝胶现象产生，也可以熔化在火焰中。

斧石主要存在于接触变质蚀变的钙质岩石中，晶体为板状和楔形，主要是块状、片状的集合体；颜色多样，包括红棕色、黄色、无色、紫罗兰色和灰色等，断口为贝壳状或参差状，条痕呈无色，具玻璃光泽，从透明到半透明。世界最著名的斧石产地是法国。

第六节 锂辉石、硬玉和阳起石

锂辉石主要形成于花岗岩、伟晶岩中，常与长石、白云石、黑云母、石英、绿柱石、电气石、黄玉等矿物共生。锂辉石的晶体为扁平柱状，双晶，晶体表面有纵纹，还有明显的三角形表面印痕，偶尔会形成

巨大的晶体，还以劈裂的块状体产出；颜色多样，包括无色、白色、灰色、浅绿色、浅黄色、淡紫色等，断口为参差状，条痕呈白色，具玻璃光泽，从透明到半透明。锂辉石不溶解，但可熔化，因为含有锂元素，所以在燃烧时会有红色火焰出现。锂辉石有紫锂辉石和翠铬锂辉石两个品种，翠铬锂辉石呈绿色，晶体非常小，仅仅产于美国的北卡罗来纳州。

硬玉是由钢和铝的硅酸盐矿物组成，含有多种氧化物，其中二氧化硅占58.28%，氯化钠占13.94%，氧化钙占1.62%，氧化镁占0.91%，三氧化二铁占0.64%，除此之外，还含有微量的铬、镍等元素。主要形成于超基性岩和某些片岩中，也会形成于小矿脉或燧石、杂砂岩透镜体中。硬玉的晶体为细小的柱状，晶体表面有条纹，但很少形成晶体，如果形成晶体，则多为双晶，通常以块状、粒状的集合体出现；颜色为绿色，偶有白色、灰色和紫红色，含有氧化铁杂质时，会呈黄色或棕色；断口为多片状，条痕呈无色，具玻璃光泽或油脂光泽，半透明。硬玉按颜色和质地可以划分为20 多个品种，包括宝石绿、艳绿、黄阳绿、阳俏绿、菠菜绿、蛙绿、瓜皮绿、油绿、紫罗兰、藕粉色等。

阳起石是硅酸盐类矿物中的角闪石族透闪石，主要形成于片岩、角闪岩中。阳起石的晶体为长叶片状，双晶，也以片状、柱状、纤维状、粒状的集合体出现。颜色从淡绿色到墨绿色，断口为贝壳状或参差状，条痕呈白色，具玻璃光泽，从透明到不透明。阳起石多用于医药，对阳痿和妇女子宫久冷等有治疗效果，还可缓解腰膝酸软等症状。阳起石是透闪石中超过2%　的镁离子被二价铁离子置换而形成的矿物，如果阳起石中铁的含量比较高，会呈现出深绿色或者黑色，被称为铁阳起石。石棉状阳起石的颜色为白色或灰色。阳起石质硬而脆，折断后的断面不是平整的，呈纤维状或细柱状。

第七节 针钠钙石、硅灰石和柱星叶石

针钠钙石主要形成于玄武岩空洞（熔岩的气孔）中，常与沸石类矿物共生，如片沸石、钙十字沸石、方沸石等，也有少量形成于钙质变质

岩、碱性侵入岩和云母橄榄岩中。针钠钙石的集合体是针状，常以块状体、板状晶体产出；颜色包括白色、无色、浅灰色、深色状，断口为参差状，条痕呈白色，具玻璃光泽或丝绢光泽，透明或半透明。鉴定针钠钙石，可视其能否在盐酸中产生凝胶现象和在密闭空间内加热是否会生成少量水分作为特征和依据。针钠钙石的著名产地有美国加利福尼亚和英国的爱丁堡。

硅灰石矿石有两种自然类型：矽卡岩型矿石和硅灰石型（如石英、方解石）矿石。矽卡岩型矿石主要存在于矽卡岩型矿床中，矿物组成很复杂，常与石英、方解石、透辉石、石榴子石等矿物伴生；硅灰石型矿石主要形成于接触变质岩、区域变质岩型矿床中。硅灰石的晶体构造有两种：致密块状矿石和粗晶硅灰石矿石，致密块状主要以粒状、柱状、纤维状的集合体产出，有个别极细粒致密的呈玉状；后者主要呈板柱状、束状、放射状。硅灰石是一种新兴的工业原料，主要应用于陶瓷工业上，其次也用作冶金保护渣和涂料，还可用作制成电焊条药皮、石棉代用品、磨料黏结剂、玻璃配料及生产橡胶、塑料、绝缘材料、纸张等物品的填料。硅灰石的主要产地是美国、俄罗斯等。

柱星叶石是一种主要形成于中性深成岩中的副矿物，常与蓝锥矿、钠沸石等矿物伴生。柱星叶石的晶体为柱状，晶面呈正方形；颜色是黑色、深棕色，断口为贝壳状，条痕呈红棕色，具有玻璃光泽，而且不透明。柱星叶石在丹麦格陵兰岛被首次发现，世界上著名的柱星叶石产地是美国加州的达拉斯宝石矿、加拿大魁北克省的圣海拉尔山，以及澳大利亚、俄罗斯、丹麦等。

第八节 白云母、锂云母和黑云母

白云母在世界范围广泛分布，主要形成于岩浆岩中，尤其是花岗岩等酸性岩石，还会形成于变质岩中，如片岩、片麻岩等。形成于花岗岩中的白云母晶体，有着巨大工业价值；伟晶岩中的白云母则是经过多个阶段形成的；变质岩中的白云母分布范围广泛，是在高温和钾的双重作用下形成的。白云母的晶体为板状，晶体表面是六边形，双晶，也以鳞

片状、致密状的集合体出现；颜色多样，包括白色、灰色、绿色、红色、棕色等，断口为参差状，条痕呈无色，具有玻璃光泽或珍珠光泽，从透明到半透明。白云母不溶于酸，隔热性很强。

锂云母又叫鳞云母，是常见的锂矿物，常与电气石等矿物一起形成于酸性岩石中，如花岗岩、伟晶岩等，也有生成于含有大量锡的矿脉中的。锂云母的晶体为板形，晶体形状是假六面形，也有以鳞片、块状的集合体产出；颜色包括粉红色、紫色、浅灰色、白色等，断口为参差状，条痕呈无色，具珍珠光泽，从透明到半透明。锂云母熔化时会产生气泡，同时产生深红色的火焰，不溶于酸溶液，但熔化之后能够与酸进行反应。锂云母是提取稀有金属锂的重要矿物之一，由于它常常含有铯和铷，因此也是提取这些稀有金属的重要原料之一。

黑云母主要形成于岩浆岩、变质岩中，黑云母的晶体为板状、柱状、锥状，最常见的是假六方板体；颜色包括黑色、深棕色、黑棕色、绿色等，偶尔会有白色的黑云母，但极其罕见；断口为参差状，条痕呈无色，具玻璃光泽，从透明到半透明。黑云母受热水溶液作用后可蚀变为绿泥石、白云母和绢云母等其他矿物，但含铁量高，绝缘性能差。黑云母可应用于建材行业，用作建筑材料的填充物，也可广泛应用于消防、造纸、橡胶等化工工业，有着很高的实用价值。

第九节 中长石、奥长石和培斜长石

中长石和奥长石都是中性斜长石，是钙长石和钠长石的过渡类型，主要形成于中性岩和变质岩中，如安山岩、角闪岩等。中长石的晶体为板状，双晶，主要以致密状、块状、粒状的集合体出现；颜色有灰色、无色或白色，断口为贝壳状或参差状，条痕呈白色，具玻璃光泽，从透明到半透明。

奥长石又叫更长石，也是斜长石的一种，主要形成于喷发岩、变质岩和深成岩中，如花岗岩、伟晶岩、中性正长岩、安山岩、玄武岩等。奥长石的晶体为板状，双晶，主要以块状、粒状、致密状的集合体出

现；颜色多样，包括灰色、白色、浅黄色、棕色、浅红色、无色等，断口为贝壳状或参差状，条痕呈白色，具玻璃光泽，从透明到半透明。奥长石的包裹体有灿烂的反射光，这也是对它进行鉴定的主要依据。奥长石可作为玻璃工业和陶瓷工业的制作原料。奥长石混合钠长石或金属矿物后，呈肉红色，并因含有鳞片状镜铁矿细小包裹体而显现金黄色闪光的变种，又被称为“日光石”，只是产出较少，属于中档宝石。奥长石在世界各地均有广泛分布。

培斜长石同样是一种斜长石，它是多种岩浆岩的重要组成，如粗弦岩、玄武岩、苏长岩等，主要形成于变质岩中，如片麻岩、片岩等。培斜长石的晶体为板状，双晶，主要以块状、致密状、粒状的集合体出现；颜色有白色、无色、灰色和浅棕色，条痕呈白色，具玻璃光泽，从透明到不透明。培斜长石是陶瓷工业和玻璃工艺的制造原料，其中色泽美丽的培斜长石还可以用来制作宝玉石，如日光石。培斜长石的分布范围非常广泛，全球均有产出。

第十节 青金石、白榴石和方柱石

青金石的工艺名称为“青金”，它的波斯语和阿拉伯语分别为“拉术哇尔”和“拉术尔”，印度语为“雷及哇尔”。青金石是一种透明或半透明的宝石，颜色有蓝色、蓝紫色或蓝绿色，主要由天蓝石和方解石两种矿物组成，一般形成于高温变质石灰岩中。青金石的晶体是菱形十二面体、八面体或立方体，但很少见，主要以致密块状、粒状的集合体出现；颜色多样，包括深蓝色、紫蓝色、天蓝色、绿蓝色等，断口为参差状，条痕呈蓝色，具暗淡光泽，半透明。青金石与其他宝石的最大区别在于，它不是一种矿物而是一种岩石。青金石常被用来制作成念珠、钟壳、表盘、烟盒等装饰物；同时，它也是适合男士的一种珠宝饰物。青金石最著名产地是阿富汗，美国、缅甸、加拿大、蒙古、智利、安哥拉、巴基斯坦和印度等也有产出。

青金石制作成的小饰品受到人们的喜爱，因为它充分体现了人们温文尔雅的高贵气质。此外，青金石还有利于睡眠，能帮助冥想练习者迅

速进入冥想状态。如果在开车时佩戴它，能保持心境的平和，消除由于交通不畅引起的情绪不安。小朋友佩戴青金石还可促进身体发育。

白榴石属于长石类，主要形成于基性岩中，特别是富含钾的基性岩。白榴石晶体属于四方晶系，通常为四角体或八面体，也有立方体和十二面体，晶体表面布满双晶条纹，晶体形态主要是双晶；颜色为白色、无色、灰色、黄白色等，断口是贝壳状，条痕呈红色，具玻璃光泽，从透明到不透明。白榴石是提取钾、铝和工业明矾的主要矿物，具有重要价值。其主要产地是意大利的维苏威火山、美国。

白榴石属于典型的硅氧不饱和高温矿物，常见于第三纪之后的火山熔岩中，不能与原生石英共生。白榴石在后期作用的影响下，常变化为正长石和绢云母，但外形不会改变，所以又被称为“假白榴石”或者“变白榴石”。在受到含钠溶液作用时，白榴石会变为方沸石，转变的过程中，白榴石的钾元素会溶解到土壤中，因此，含有白榴石的土壤通常比较肥沃。

方柱石是方长石矿物，在化学组成上是完全类质同象系列的一族架状结构硅酸盐矿物的总称，主要形成于远基性成分出现变化的岩浆岩中，也可能出现在深层变质岩中。方柱石又叫“文列石”，这是以德国探险家和矿物学家哥特别·文列的名字命名的，以纪念这位伟大的人物。方柱石遇长波和短波紫外线会产生反应，并有强磷光现象出现。方柱石的晶体为柱状，以块状、粒状的集合体出现；颜色多样，包括无色、白色、灰色、浅黄色、粉红色等，断口为贝壳状或者参差状，条痕呈无色，具玻璃光泽或珍珠光泽，从透明到半透明。方柱石的分布范围非常广泛，但宝石级的方柱石极罕见。方柱石的主要产地是缅甸的莫谷、巴西、马达加斯加、莫桑比克、坦桑尼亚、斯里兰卡、加拿大的安大略和魁北克等。

人类卷

布封的《人类史》对于人类何时在自然界中出现、最初的生活状态以及有着怎样的本性、又是由哪些物质构成等问题做了讲述，探究了人类的演变原因。布封认为，人类的诞生来源于自然斗争。他在书中指出，人类是地球上有史以来最具智慧的生物，不仅可以改造自然，其本身也在被生命的内部活力所改变。此外，布封还提出，生命存在且只能存在于物质之中，人类属于动物的一种，相比其他动物，人类的高级之处在于具有了灵魂。

布封对人类的歌颂，体现了其深受启蒙思想运动影响的资产阶级的积极思想。

第一章 人的一生

时间的推移令一切事物都处于演化过程中，如宇宙、地球、动物、植物等。相同的道理，人类也有自己的演化过程。因此，只有在经历了漫长的演化之后，我们才会逐渐体悟到生命的全部：从新生的婴儿到童年、成年、老年，最后是死亡。所以，我们对自身的认知，首先应该建立在对自己一生的发展变化有所了解的基础上，否则，我们无法认识到人类的本质。

第一节 童年

相关研究表明，人类一生中最虚弱的时期是刚出生的时候，因为刚来到世界的新生儿是没有办法运用自己感官的，他们只能依靠来自外在的精心照顾。说起来，这个时期的人，其生活的场景确实是一副可怜而痛苦的样子，刚来到这个世界时的人类新生儿，比其他任何动物更为脆弱，娇弱的生命似乎随时都会结束。他无法动弹，更不能站立起来，拥有的仅仅只是存在的事实，只能通过呻吟来表达自己的痛苦。

这似乎也在告诉人类，来到这个世界的意义就是为了承受痛苦，就是为了面对成人所意识不到的虚弱和痛苦——这是我们不能忽视的事，因为这个阶段我们每个人都曾经历过。所以，就请跟随笔者的叙述，去再次感受一下我们身处摇篮的情形吧。

当新生儿从一个环境进入另一个环境时，比如从母体的羊水中进入流动的空气中，这时，尽管新生儿没有成年人所具备的各种能力，但他依然能够感觉到空气的流动，流动的空气会对他的嗅觉神经和呼吸系统产生刺激。空气的流动类似人打喷嚏，能促使新生儿的胸部扩张，空气会在这时自由进入他的肺部，使肺泡扩张膨胀，进而提高肺部空气的温度，然后又下降到某一程度，接着，气流受到膨胀的肺纤维的弹力作

用，将空气排出肺部。这就是生命体的呼吸过程。

笔者在这里并不想对呼吸运动持续不断的原因进行解释说明，而只是讲述呼吸现象。无法否认，对于人类和一些动物来说，呼吸运动是非常重要而且不可缺少的。因为生命有赖于呼吸的维持，如果呼吸停止了，人类和动物的生命都会面临终结。因此，胎儿在学会呼吸之后，就会持续不断地进行下去。

然而，有大量的研究数据表明，婴儿的蝶骨卵圆孔在刚刚出生时并不会完全关闭，因此有一部分血液还是会从这里流出，而且并不是所有血液都会进入肺部，所以在较短的时间内，新生儿呼吸不到空气也不会立即死亡。

关于上面的这个结论，十年前笔者曾经利用小狗做过一些实验，实验的结果对上述结论进行了充分的证明。实验过程简述如下：首先，将一只即将临产的母狗放进装满水的木桶中，然后将母狗用绳子捆好，再把它的后半部分身体浸于水中。不久，母狗生下三只小狗，当小狗们离开母体后，马上把它们放入温度和母狗腹部温度相同的液体中，其间没有给小狗呼吸的时间。之后，将小狗放入装满热牛奶的木桶中——这样做的目的是让它们在有需要时，可以获得充足的食物。小狗在牛奶中浸泡半个小时后，逐一把它们拎出来。结果令人惊奇，三只小狗都活着！它们这个时候开始呼吸，脸上也有了表情。在它们经过半个小时的呼吸后，再次把它们泡入热牛奶中；半个小时后，又将它们重新拎出来，有两只小狗的精力仍然充沛，并有表现出缺少空气的痛苦，但另外一只则显得比较疲惫，它应该是承受不了再次的浸泡了，于是将它放回到母狗身边。

这只母狗在水中先产下三只小狗，从水中离开后又产下了六只小狗。在水中出生的小狗尚未有呼吸的时间，就被放入牛奶中待了半个小时，然后被拎出来呼吸了半个小时，接着再次被放入牛奶中待了半个小时，但它们没有表现出不健康症状。虽然笔者没有对这个实验继续下一步的研究，但结果已经足以表明，对于新生命来说，呼吸并非如成年人那样必不可少。如果能细心保证新生儿的蝶骨卵圆孔不闭合，他就能在没有空气的环境中存活。我们或者还可以借助这种方法，培养出色的潜

水员，以及培育既可以在陆地生存，又能在水中生存的两栖动物。

以上的讲述都是笔者对于新生儿呼吸状况的见解，接下来我们将对新生儿的感官系统进行讨论。感官，是新生儿需要学习才会使用的器官，其中最重要、最奇妙的是视觉，同时，这也是最容易引起错觉的器官。如果眼睛的判断没有得到触觉的立刻验证，那么这就是错误的判断。相反，触觉可以说是最可靠的器官，在对其他器官进行验证时，它无疑充当了试金石的效用。此外，触觉是多数动物唯一的基本感官，但新生儿还不具备完全掌握这种感官的能力。新生儿通过哭泣或者呻吟表达痛苦，但却无法用表情来表示快乐，通常在出生40多天后，新生儿才会笑、会流泪，在此之前的那些呻吟和喊叫并没有眼泪相伴。因此，新生儿落地之初，脸上毫无表情，也没有任何情感的表示，而且其身体的各个部位都很脆弱而娇嫩，只是会一些没有规律的下意识动作。当然，这一时期他们无法站立，仍然如同在母体子宫内那样习惯性地蜷缩着屁股。他们没力气主动伸出手臂，或是用手抓拿东西，只能面朝上躺着，若是无人照顾，身也不会翻。

从上面讲述的现象中，我们可以了解，新生儿最初表达痛苦是通过哭泣或者呻吟。但这只是发自他躯体的一种感觉，这和动物刚出生时以呻吟表达痛苦极为相似。新生儿在出生40多天之后，精神上的感觉才会逐渐表现出来，因为无论是眼泪，还是笑容都是内心情感的表现，是他滋生的精神行为所决定的。笑是通过视觉，或者是对所见物品的喜欢以及想要物品的记忆所表现出来的愉悦；而泪水则是不愉快时的情感表现，并且混合着怜悯或者对自身的反省。这两种情感，都是以知识、比较和思考为前提条件的。总的说来，泪水和笑容是人类特有的，是表现痛苦和快乐的精神体现，但叫喊以及其他表示痛苦或快乐的身体姿势，是人类和动物共有的。

我们不会在新生儿刚出生时就马上给他喂奶，而是先帮助他把胃里的黏液、流质，以及肠道中的胎粪吐出来，因为这些东西会让奶变酸，从而对新生儿的身体造成不良影响。因此，新生儿出生之后，人们会先给他喂一些甜酒，使他的胃强壮起来，以便更好地适应食物并促进消化和排泄。在新生儿出生10个小时或者12个小时之后，才开始给他第一次喂奶。

胎儿离开母体之后，四肢刚刚感受到伸展和运动的自由，却马上被束缚住——脑袋被固定，两腿被拉直，手臂也被放在身体两侧。他的周围都是衣服和绷带，躺着时便被裹得严严实实的，令他无法改变姿势。不过，假如没有这些束缚或者让他任意侧卧，他的唾液就会流出来，影响发育。有一些习惯把孩子盖起来或是为他们穿上衣服，而不是将小孩裹在襁褓中的民族，在这方面有自己的做法。比如俄罗斯人、日本人、印度人、黑人、加拿大人、美国弗吉尼亚和巴西的土著人以及南美洲的许多民族，会把孩子就那样赤裸着放在吊床上，或者放在摇篮中，仅用毛皮盖住。笔者认为，这种方法要比我们普遍使用的方法好很多。孩子被包裹所束缚，会觉得不舒服，甚至感觉到痛苦，而他们为了摆脱束缚所做的使劲挣扎，仅仅只能将捆裹他们的衣物弄乱，却对受束缚的状况无法改变。这种具有束缚性的绷带，与女孩子青春期所戴的文胸有相同的性质，这类人们用以支撑身体、防止变形，但确实让人感觉不舒服的东西，带来的只是更多的不便和畸形。

婴儿在襁褓中乱动虽然可能会对他们的身体不利，但将他们束缚在不能动弹的状态中也同样有害，因为婴儿要是缺少锻炼，就会阻碍四肢的发育，身体的力量也得不到发展。因此，相比包裹在襁褓中的婴儿，四肢能够自由活动的婴儿明显长得更强壮。或许古代的秘鲁人正因为了解了这一点，才将婴儿放在宽松的襁褓中，让他们能够自由活动四肢，在婴儿稍长大一些之后，又将他们放到一个高度仅到婴儿腰部位置的土炕上。这样，婴儿不仅四肢自由，还能转动脑袋，弯曲身体，不会摔下来，也不会让自己受伤。当婴儿开始尝试挪动时，母亲会将乳房移得离他稍远一些，诱使他自己多运动。小孩吃奶的姿势有时候很累人，他们会用腿紧紧地夹住母亲的胯部，以支撑住自己的身体而不需要借助母亲手臂的帮忙，因为他们会用手抓住母亲的乳房，不断地吮吸，只要嘴不离开就不会掉下来。有些婴儿两个月时就开始行走，更准确地说，他们是用膝盖和手爬行。这样的练习在经过一段时间后，会令他们迅速移动，就像用脚走路一样。

当然，只有母亲才能在照料婴儿时持续地表现出温柔的耐心和细微的警觉，给予他们无微不至的关怀，这是受雇用的奶妈不可能做到的。有些奶妈会把孩子放在一边，长达几个小时不加理睬，更甚者对于孩子

的哭泣也不闻不问。因此，这些孩子经常会竭尽全力地大声哭叫，最后即便没有生病，身体也会变得非常虚弱，这样不仅对正常生长有损害，还会影响他们将来的性格。还有一些不负责又懒散的奶妈常常失职，其中最典型的就是，当孩子哭闹时她们只随随便便地摇晃摇篮，而不是采取更好的措施。摇晃摇篮尽管可以让孩子分心，甚至是平息哭闹，但这种运动持续进行，时间一长就会让孩子因头昏而入睡，造成隐患。而且，长时间的摇晃还可能导致孩子呕吐，甚至会因脑袋受到震荡引起腹泻。

在对孩子进行抚慰时，如果已经确定他们不缺什么，就不要一直摇晃他们，以免将孩子摇至头昏脑涨。如果觉得孩子睡眠不足，只需要用轻微而舒缓的动作慢慢促使他们入睡就好，尽量不要摇晃。为了孩子的身体健康，应该让孩子自然入睡，但也不能让他们睡得太长，否则可能会令孩子的体质变差。如果孩子比较嗜睡，那么应该将他们从摇篮里抱出来，轻缓地唤醒他们，然后让他们听听温和的声音，看看发光的物体。

孩子的眼睛总会被光亮吸引，但如果只用一只眼睛捕捉亮光，那么另一只眼睛的视力会受到不良影响，发育不好。为了避免这种状况出现，需要选对摇篮的放置方位，最好是放在光线可以从脚照过来的方向，或者放在窗户旁边。这样孩子的一双眼睛就能够同时接收到光线，如果一只眼睛接收光线比另一只多，可能会在未来影响孩子视力，演变成斜视。科学已经证明，用眼不均衡是导致斜视的主要原因。

新生儿出生后的两个月内，最好是用母乳喂养，尤其是体质比较弱或者消化不良的婴儿，更需要喂养母乳；就算是接下来的两个月，最好也让孩子只吃母乳。如果在孩子出生的第一个月就让他吃母乳之外的食物，那么无论这个婴儿看起来多么强壮，他的身体都会存在很大的问题。在荷兰、意大利、土耳其和地中海东岸的大部分地区，婴儿在一岁之前都是吃人奶。而加拿大的某些土著会让孩子吃奶到四五岁，甚至是六七岁。不过，在这些国家中，也有哺乳者因自己奶水不足，所以一直会用一种面粉和奶的混合物喂给孩子吃。这种食物虽然能够减轻孩子的饥饿感，但因为婴儿的肠胃极为娇嫩而脆弱，难以消化这类粗糙、黏稠的食物，所以，这些婴儿常常感到不舒服，很容易生病，甚至会因为消

化不良而夭折。

不过，动物的乳汁有时候可以替代母乳，比如有的母亲因为缺乏奶水，又或者担心自身病菌传染给婴儿，但又希望婴儿可以得到营养充足的奶水，就会以动物的乳汁喂食婴儿。笔者曾经认识几个没有奶妈、只靠吮吸羊奶长成的农民，他们的身体跟其他人一样强壮。

当然，如果母亲能亲自喂养孩子，在很大程度上会令婴儿的身体更加强壮，更加有力。因为母亲的乳汁肯定比其他任何食物更适合孩子。这是因为，胎儿在母亲的子宫时，所吸收的就是与母亲乳房中的乳汁非常相似的奶状液体，所以婴儿已经习惯了母亲的乳汁。而奶妈或是其他的奶对他而言，都是新的、需要适应的食物。有时，这些乳汁甚至与母亲的乳汁完全不同，让婴儿难以适应。一些婴儿如果不能适应这些外来的乳品，身体很快就会消瘦，变得没有精神，甚至生病。如果出现了这种情况，一定要及时为孩子更换，因为稍不注意，就可能危及孩子的生命。

笔者发现，人们在喂养孩子时有一种较为普遍的做法，即，将许多孩子集中在同一个地方，比如一些大城市的医院里。这种做法与笔者提倡的分别喂养法相违，而且这些孩子中的大部分很容易患上败血症或者其他相同的疾病。但如果将他们分开喂养，或者是分组分散到城市的不同地点（最好是农村），那么，他们同时患病的概率就会降低很多。而且，如果一个婴儿生病了，其治疗费用就足够抚养其他的孩子。所以，分开抚养法是科学的，也对人类的发展具有重要意义，因为，对于一个国家来说，人，才是最难得的财富。

有些孩子两岁时就能清晰地发音，甚至能重复大人教他的话，但大多数孩子是两岁半之后才开始说话，有些孩子甚至还要晚一些。笔者发现，说话早的孩子往往比说话晚的孩子说话流利，而且说话早的孩子在三岁之前就能学习识字了。在笔者认识的孩子中，有几个孩子从两岁就开始识字，四岁时已经可以独自阅读。但笔者无法确定对儿童进行早期的启蒙教育是否真的有益，毕竟有很多早期启蒙教育失败的案例，许多小神童到了二三十岁就变成了平常人，甚至是智力低下者。因此，笔者认为最好的教育方法应该是最普通的、顺应自然天性的教育方法，也是

最相称的教育方法。当然，这里讲的“相称”指的是针对儿童自身的弱点来讲，而不是针对他们的优点。

第二节 成年

人类从童年过渡到成年要经历较为漫长的时间，在这个过程中，他们开始适应这个世界的一切规律，并对这个世界做仔细观察。他们的身体开始发生变化，骨骼渐渐成熟，行为变得敏捷，慢慢有了自己的思想。与此同时，男女之间的生理差别也开始突显出来：男性主要体现在长出胡须、喉结，肌肉量增大；女性则主要体现为乳房变得丰满，月经来潮等。成年期的个体从青年末期脱离出来，进入另一个人生阶段，新的生理和行为特质也随之产生。个体在面对这些新的改变时，必须学习新的思维方式和行为模式，他们必须要有区别于之前的想法和做法，同时也会牵涉相对应的许多情绪问题。

处于这一阶段的人需要学习成人的法则，让自己成长为一个成人。同时，大部分国家都在这个阶段赋予年轻人各种活动的权利，比如在法律中订立18岁为成年标准。一旦年满18岁，就享有公民权，拥有各种相应的权利，如参政权、结婚等，但同时也要承担相应的义务，如法律责任等。

人类优于其他生物这个事实是毋庸置疑的，无论外表还是行为。人的身材挺拔，直立的姿态显出高贵。当人仰面望向天空时，脸上是庄严的表情，而且，人的抽象灵魂可以体现在具体的表情上，卓越的天性使人的面部表情变得更加生动；人挺立的身姿和坚毅的举止，都彰显出他的高贵地位；人类以足直立于地面，从高处俯视大地，表现着对土地的征服；人的双臂并非为支撑身体而生，而是有着更为高级的用途——与其他感官系统相互协调，共同完成思维下达的命令，抓握事物或是拥抱别人等。

当人的心灵平静时，其面部肌肉处于一种静止状态。这些肌肉相互配合并统一，共同清晰地将思维活动和内心世界表现出来。不过，当人

的灵魂激荡时，脸上就会出现生动的表情，人的思维活动和各种情感都通过细微的肌肉变化表现出来。肢体语言也能够将人的性格特征表现出来，他的感受在这种时候往往会先于意愿表现出来，并且以丰富而生动的面部表情呈现出神秘的内心世界。

人的眼睛能够透露出人的内心变化，因此，相比其他器官，眼睛与心灵的联系更为紧密，它仿佛接触并参与了心灵的一切活动。眼睛可以表露出心灵的变化情况和各种感觉，还会表现出心灵的各种最细腻的情感。眼睛能够同时吸收和反射思想的光辉和情感的光芒，因此也能反映思想的感觉和智慧的语言。

我们曾经执着于仅从外部看事物，却从来没有思考过这些外部事物会对我们的判断产生什么样的影响，虽然根据事物的外部特征所做出的判断是有力的，也是经过了深思熟虑。这却造成我们在观察一个人的时候，往往根据他的面部表情来断定他的观点，而往往忽略了他的衣着打扮。事实上，一个敏感的人应该把服饰视为自身的一部分，因为在观察者看来，服饰就是穿戴者的一部分，它们带给我们对于穿戴者的完整印象。

第三节 老年和死亡

自然界中存在的所有事物，都要经历变化、变质、消亡，人类亦如此。人的身体一旦达到完美程度，便会逐渐衰退，这种衰退最初是难以察觉的，需要累积到一定的时间之后才会发现较大的变化。不过，我们一定比那些只会估算年轮的人更懂得年龄的价值，因为既然别人根据我们的外部变化所做的推断都能大致讲出我们的年龄，那么，如果我们对自己进行正确的评价，真正地了解产生外部变化的原因，就更清楚自己的实际年龄。因此，别人对我们年龄的判断，都不如我们自己的判断。

人体在各个方面都发育完成之后，皮下脂肪的厚度就会逐渐增加。脂肪厚度的增加表明身体开始进入衰退，因为这种增加不会让身体更加活跃，也不是身体各个部分的继续发育，而是身体过剩物质的简单积

累。皮下脂肪的厚度增加通常是人处于30岁到40岁之间时，导致人的身体在活动中不再自如轻盈，生殖能力也会接着衰退，四肢变得笨拙并逐渐失去力量，敏捷度也大大降低。

此外，人的身高和体重在发育完全之后，骨骼和身体的其他部分会变得更加坚实。身体内部之前用来提供器官生长的营养物质，现在只是用来增加脂肪的厚度，并逐渐沉淀在器官内部。于是薄膜转变成软骨，软骨转变成骨质，骨质变得更加坚硬。人体的纤维也都变得坚硬，皮肤变干糙，皱纹开始出现，头发逐渐变白，牙齿开始松动脱落，身躯不再挺直。这些身体上的变化在40岁前就逐渐出现，但要在60岁到70岁时才明显。70岁之后，人体各个器官的功能衰退得越来越快，随着衰竭的继续，多数人的生命会在90岁到100岁之间终结。

如果人的一生都过得很幸福，对于身后之事丝毫不畏惧，那么死亡就不是什么可怕的事。既然人类已经在其他阶段为衰老做了充足准备，既然死亡和生命一样是人生中的一个阶段，两者以同样的方式发生在我们身上，都是如此难以预料且无法避免，那么人类为什么要对这一刻的到来这样恐惧呢？那些常与弥留或濒死之人打交道的神父和医生都承认，除了很少部分人是因为急症引起的痉挛而死于痛苦的折磨之外，多数人都会安宁而平静地死去。因此，我们可以肯定，比折磨人的病痛更让人们害怕的，是对死亡的恐惧。许多人在目睹了病人垂危或弥留之际的情景后，几乎都会记住，特别是死者的家属。

大部分人在将要死亡时是没有知觉的，只有极少数人会把知觉保留到最后一刻。一个不知道自己是否患上不治之症的病人，会根据家人的不安、友人的伤心，还有医生的神态等情况来判断出自己的病况。尽管这些细节会令他有所察觉，但他从来没有意识到自己的生命已走到尽头。病人只关心自己，不轻易相信别人的判断。他认为不必惊慌，只要还有知觉和思维，病人就只会从自己的角度思考。虽然一切都会消失，但希望依然存在。

例如一个病人，虽然他不断地说自己感觉到了死亡的威胁，也清楚知道自己无法继续生存下去了，可能马上就要离开人世。不过，当有人出于好心或是不慎告诉了他，他的生命即将终结时，他的反应会异常激

烈，似乎这是一个完全出乎意料的消息。他并不相信别人说的话，是因为他从来没有真正承认自己会死亡，他只是对自己的情况感到不安和怀疑，但从没有认为事情会真的变得那么糟糕。

死亡并非人们想象中那样可怕，只是因为我们内心对它的印象太糟糕，所以它好似一种难以摆脱的恐惧，离得越远就越让人心惊；一旦走近就消失不见。正是如此，人们对死亡的认知只是一种虚假的概念——不仅把死亡看作是最大的不幸，还认为它是伴随着痛苦和煎熬的一种恐惧。有时候，人们甚至试图在想象放大这些恐怖的形象，在对痛苦进行思考的同时掺杂和进一步增加了恐惧的成分。有人说，当灵魂从肉体脱离时，或许就是生命走到了尽头。衡量时间的另一种方法是思维的延续过程。当这些想法随着强烈的痛苦在脑海中闪过时，痛苦只是一瞬间；而如果这些想法在我们心平气和时出现，那么它持续的时间就会很长，甚至会超过一个世纪。这样的哲理在哲学中很常见，它对人类在死亡的看法上，产生了重要的影响，导致想象中的死亡比实际中的死亡更为可怕，只有极少数人不会受到这种观点的影响。因此，我们必须揭开这些虚假观点的真面目。

笔者对于这个题目的论述，只是希望驳斥一种与人的幸福观截然不同的偏见，因为笔者曾经遇到过受这种偏见影响的人。这种偏见似乎只会让那些受过教育而变得非常敏感的人受到影响，而淳朴憨厚的乡下人却总能勇敢而毫无畏惧地面对死亡。

真正的哲学就是正确地看待所有的事物，人类的内心情感始终与这种哲学联系在一起，但人类的想象力总是会被侵蚀。事实上，生命的彼岸既没有什么可怕的，也没有什么可爱的，我们要理智、勇敢地从近处看待它。

第二章 人类本性的丧失——习俗的恶果

作为18世纪法国著名的启蒙思想家，布封对封建特权制度和天主教会，还有在此影响下形成的各种陋习深恶痛绝，他向往的是合理、公正的社会。在布封看来，人的本性是美好善良的，世界也可以被建成令人满意的和平之地，但不良的教育、有害的制度以及不合理的习俗，造成了世界上的罪恶；迷信、愚昧和成见是人类最大的敌人。布封主张一切制度和观点要在理性的审判庭上批判和衡量。他从习俗对男性和女性造成的束缚和伤害开始论述，将破坏人性的陋习直观而形象地披露在人们面前。

第一节 对男性的迫害——割礼

青春期是少年期之后的一个时期，大自然对这一时期的人，不仅开始塑造其外形，还赋予了生长发育所需的东西。青春期的孩子默默地过着一种特殊的生活，他们脆弱又自我封闭，少与外界有交流。但很快，他们的生活会变得丰富多彩起来，不仅拥有自我生存的必需品，还会给予别人生存所需的东西。青春期的人所具有的这种旺盛生命力和活力不仅在体内存在，还会以各种信号向外面扩展。

因此，我们可以用自然的春天来比喻青春期，这是人一生中最快乐的季节。不过，这个时期有些东西是我们无法忽视的，那就是伴随青春期的到来而出现的割礼、阉割、童贞和阳痿。由于它们与人类历史紧密相连，因此，这是我们不能回避的事实，如果我们想要努力而恰当地介绍这些情况，那么，我们的讲述就应该像亲眼看见一样，需要一种冷静的哲学态度。

割礼，是一种古老的习俗，这种陋习在亚洲的许多地区如今依然存在着。不同国家举行割礼的时间是不同的：希伯来人会在婴儿出生之后

的第八天，为他们举行割礼；古波斯人是在孩子五六岁时为他们举行割礼；土耳其人则是在孩子七八岁或者十一二岁时为他们举行割礼。割礼之后，人们常把碱粉或收敛药粉撒在伤口上，以促进伤口快速愈合。而夏尔丹人认为烧过之后的纸灰是愈合伤口的良药。在马尔代夫群岛，会在孩子七岁时实施割礼，但在进行仪式之前，他们先将要进行手术的孩子在海水中浸泡六七个小时，让孩子的皮肤变得很柔软。至于割礼时使用的刀具，古代以色列人是用石刀，犹太教会至今保留着这个习俗。

割礼并不都是一种宗教仪式，在某些地区，医者也会对某些患者实施割礼术，比如土耳其人及其他一些民族，他们沿袭割礼这一习俗有着相同的目的——割断包皮，以避免其过长而影响生活。拉布莱说，他曾在美索不达米亚和阿拉伯沙漠以及底格里斯河和幼发拉底河沿岸，看到过许多阿拉伯男孩因包皮长得过长，而需要实施割礼。他认为，一些民族的男子如果包皮太长，会影响他们繁殖后代的能力。

除了针对男孩实施的割礼之外，某些地区对女孩也要进行割礼。在阿拉伯和古代波斯的一些国家，如古波斯湾和红海沿岸地区，女孩会如同男孩一样经过类似的手术。不过，通常会等到女孩子青春期之后，才会对她们实施割礼，因为在此之前是没有必要的。在其他地区，如贝宁河两岸的一些国家，由于女婴的小阴唇长得比较快，他们会在女婴出生8至15天内，对其实施割礼；当然，对男婴的割礼也是在相同的时间里进行。在非洲，对女孩子进行割礼的习俗有着久远的历史，希罗多德（编译者注：公元前5世纪的古希腊作家）曾经将其当作埃塞俄比亚人的一种社会习俗进行详细描述。

在生理需要的基础上，割礼自然有其一定的道理，至少可以起到清洁身体的作用。但是，锁阳和阉割的仪式，则完全是出于嫉妒，这些野蛮而荒诞的手术皆来源于邪恶和迷信。有些人甚至还为这种违反人性的陋习制定出了残忍的法律，让人们认为这种无耻的剥夺是值得称赞的，这种对身体的残害是一种美德。

所谓的锁阳手术，就是把男孩的包皮往前拉，然后用一根绳子从中穿过，等到形成伤疤之后，再用一个巨大的环来替代绳子，这个环一直会保留到实施这个手术的人满意为止，有时，甚至是终生都戴着。在东

方的僧人中，也有一些为了表示贞洁、不违反戒律，也会戴上一个很大的环。稍后我们还会就女孩子的锁阴进行讨论，我们很难解释这些男子是为了感情，还是出于迷信。总之，这是让人觉得奇怪而荒谬的问题。

对处于童年时期的男孩来说，其阴囊中有时只有一个睾丸，甚至有时一个也没有。我们并不能因此断定，有这种情况的年轻男子生理不正常。因为睾丸常常会隐藏在腹部肌肉中，它会随着年龄的增长，突破阻碍慢慢地移动到正确的位置，医学上称之为“隐睾”。这种情况较常出现在8岁至10岁的男孩，甚至是青春期的男孩身上，因此没有必要为此焦虑和担忧。成年人出现隐睾情况较为少见，可能是因为大自然想努力地让睾丸在青春期长出来，所以有一些出现隐睾情况的人，他的睾丸有时会在剧烈的运动中跳出或者脱出。但也有一些人的睾丸会一直不出来，这也可能是遗传因素造成，并不会对身体产生坏的影响，甚至比其他人更加健壮。有些男人只有一个睾丸，但这种缺陷对生殖力不会产生影响，我们也注意到，单个的睾丸会比正常睾丸大很多。也有一些男人有三个睾丸，人们的认知中会觉得这样的人更健康、更有力量。仔细对动物进行观察，就会发现，这个部位确实代表了力量和勇气。

阉割与割礼相似，也是一种古老的习俗，古埃及人曾经将其作为惩罚成年犯人的一种方法。在古罗马及整个亚洲以及大部分非洲地区，统治者常利用实施了阉割的宦官来看管自己的女人。在意大利，这种残忍的手术被用来表示一种虚幻的才能；在非洲西南部的某些民族的男子会割去一个睾丸，他们认为这样会使自己跑起来更加轻盈；在其他一些国家中，某些贫穷的人会对自己的孩子实施阉割，令他们丧失生育能力，这样做只是为了不让他们有一天像自己的父母一样无力抚养后代。

阉割方式有多种，比如，希望拥有完美嗓音的人会割掉两个睾丸，而有些疑心重重、缺乏人性的统治者为了更放心，会把为自己看管女人的宦官的整个外生殖器全部割掉。不过切除手术不是唯一抑制睾丸生长的方法，过去，人们也会在没有任何伤口的情况下将它摧毁。比如，将孩子浸泡在加入药草的热水中，然后长时间地挤压和冷却睾丸，这样睾丸的功能就会丧失。另外，还有其他一些方法，如通过器械挤压睾丸等。

从科学角度来说，睾丸切除术本身对生命不会造成太大的危险，而且可以在各个年龄段都可以进行，只是以童年时期为最佳施行期。一位历史学家曾经提出，土耳其和古波斯实施睾丸切除术的人要比用其他方法的人多五六倍。但是，将外生殖器完全切除则是一件危及生命的事情，尤其是15岁之后，外生殖器完全切除术常伴随巨大的痛苦，只有四分之一的人能活下去，并且需要花上大约一个半月的时间来休养。不过，皮埃托·德拉·瓦勒的说法则与此观点相反，他指出，古波斯一些犯强奸罪或者其他重罪的人，无论多大的年龄都会被罚以阉割极刑，惩罚手术实施完之后也仅仅在伤口上撒上些烟灰，但伤口愈合得也很好。我们没有办法了解古埃及那些同样经历过这种惩罚的人，是否能够幸免于难。据泰弗诺说，土耳其的一些被阉割之后的黑人常常会大批死亡，而且都只是一些8到10岁的儿童。

除了黑人宦官外，在君士坦丁堡、土耳其、古波斯等地，还有其他人种的宦官，他们多数来自印度戈尔孔达邦、恒河半岛、阿萨姆邦、东缅甸王国和孟加拉湾等地，还有一些来自于格鲁吉亚和北高加索的白人。塔韦尼埃说，仅在1657年，印度的戈尔孔达邦就出现了22000多名宦官。一些黑人宦官主要来自于埃塞俄比亚，因为他们在当时看起来最丑陋，所以最受欢迎，价格也最贵。

对于仅割除了睾丸的人来说，尽管剩余部分没有受到什么损害，但那些部分此后会一直处于手术前的状态，几乎不会再发育。例如，一个人在7岁时被实施了睾丸切除术，那么到他20岁时，生殖器依然是7岁时的状态。而那些在青春期或者更晚时期施行手术的人，他们的生殖器则与正常男子的生殖器相差不多。

生殖器部分与喉咙部分有着奇特的关系，如宦官没有胡须，他们的嗓音或洪亮或尖细，却不低沉。人体的某些器官相距很远，但完全不同的部位之间的联系是非常紧密的，上面的例子已经证明了这一点，并且已引起了人们的普遍关注。不过，如果我们对其中的因果关系毫不怀疑时，对于各种现象就可能忽略。或许就是这样的原因，导致我们从来没有认真检查过人体各个部位的感觉，而这些感觉大部分也存在于动物身上。

第二节 习俗给女性的枷锁——贞操

人的身体到了青春期才开始真正快速发育，小孩子在这个阶段几乎眨眼间就长高好几寸，但这并不代表身体的各个部位都是这样，与其他身体器官相比，生殖器官是表现最明显的，长得最快而且最敏感。不过，这种变化表现在男性身上，是身高的增加或力量的增大；而在女性身上，则是关于贞操，以及谈到贞操时必定会提到的处女膜。

很多恐惧失去初夜权的男人，对处女膜尤其看重，他们认为自己应该是这个女子的第一个也是唯一的占有者。男人的这种狂热心理决定了女性贞操的重要性。贞操原是心灵纯洁的一种道德表现，是精神实质，却逐渐演化成男性对生理对象的占有要求。他们为此制定一系列规则，如舆论、习俗、礼仪、迷信等，甚至在审判和惩罚中也强调贞操的重要性。对于贞操，那些滥用权力的行为和无耻的习俗都被人们接受，女性不得不接受无知的稳婆检查自己的生殖器，将身体最隐秘的部位暴露在有成见的医生面前——她们从来没有想过这根本不是对其贞操的认同，而是对贞操的无端侮辱，甚至奸淫。在笔者看来，让一个女孩子被迫接受让她感觉羞耻的场面，才是对童贞最大的破坏。

笔者不奢望凭一己之就能够推翻人们对这个问题所形成的偏见，因为人们对信了很久的事情总是很难产生怀疑，无论这件事情是多么的荒谬和不合理。因此，笔者在自己的《人类史》中，不可避免地要谈到贞操是否真的存在，或者它仅仅只是虚构出来的崇拜对象。

法洛普和其他一些解剖学家认为，处女膜的存在是事实，但它仅仅是组成女性生殖器官的一部分；他们还认为，这层膜是肉质的，幼女身上的这层膜很薄，而成年女性身上的这层膜则要厚一些。处女膜分布在身体尿道口下部，封闭了部分阴道，但其中间有一个圆形的口（也有些人的口是长形的），在女性的童年时期，这个口如豌豆大小；到了青春期，这个口变得像蚕豆一样大。温斯洛夫先生认为，处女膜是有点呈环绕状的薄膜皱襞，有的宽，有的窄，或薄或厚，有时还会呈半月状，有些女子的这个口很小，而有些女子的则很大。

昂布鲁瓦兹·帕雷及其他几位同样著名的解剖学者，对此的观点又截然不同，他们认为，处女膜的存在只是一种臆想，并非女人身体的组成部分，他们尝试用更多例子来证明处女膜是不存在的，比如对各个年龄段的女子进行观察和解剖，结果显示并没有找到处女膜。不过，他们也承认，仅仅有过少数几次看到过有连接的分叶状肉阜薄膜，但他们强调，这种薄膜的存在是一种不自然状态。解剖学家对于肉阜的质量和数量并没有统一的结论，这类肉阜薄膜与阴道有何区别？是否只是阴道的粗糙处？又或者只是处女膜的剩余部分？数量是多少？处女状态下，膜是一层还是多层？这些问题很早就被提出来了，但答案多种多样，并无定论。

这种由简单观察而得出的自相矛盾的观点，说明了有许多人希望在人体内找到事实上仅仅只是存在于他们幻想中的东西。之所以这样讲，是因为几位解剖学家已经证明，在他们解剖过的女子身上，包括青春期前的女孩子，从来没有发现处女膜或者肉阜。就算是那些认为处女膜和肉阜确实存在的人，也确认处女膜和肉阜并不是总是相同的。他们认为，在不同的人身上，有着不同形状的处女膜，宽度和硬度也不相同。通常情况下，并不存在实际的处女膜，只是由一个肉阜或者两三个肉阜组成的一层薄膜，而这层薄膜的缺口形状各异。通过这些观察，我们可以得出什么结论呢？只能得出造成阴道入口狭窄的原因并不确定，以及肯定有某种因素决定着这种情形。除此之外，就什么都没有了。

阴道入口狭窄的原因会由于人的不同而有所不同，各部分增长厚度的不同也会形成不同的形状。如同解剖学家提出的那样，有时是两个突起的肉阜，有时则是三四个，也常出现环绕状或者半月状，甚至是缩在一起的小褶皱。不过，解剖学家们也没有提到，某些狭窄入口的形状只会出现在青春期。笔者曾经对一些被解剖的女子尸体进行过仔细研究，她们身上没有出现过这种情况，以笔者对她们的了解，知道她们在青春期之前就发生过性行为。如果发生性行为的双方年龄相差不大，或者性交动作不粗暴，那么女子是不会流血的。相反，如果女孩子正处于青春期及生殖器官发育期，轻轻一碰就会造成出血，特别是身姿丰满、月经正常的女孩子；而那些清瘦或者有白带的女孩子则一般不会出现这样的现象。这些情况都充分证明出血只不过是迷惑人的现象，甚至在很长一

段时间内会反复出现。有一些女孩子在性生活中断一段时间后，处女膜会再次长出来；女孩子在刚进行性生活时会出许多血，但中断一段时间后再次性交，仍然会流血。即便是初期的性生活持续了一段时间，而且很频繁，但只要停止相当长一段时间后，处女膜就会恢复到最初的状态，出血的情况也会重复出现。因此有些失身的女人会反复使用中断非法性关系一段时间的伎俩，以迷惑自己的丈夫。虽然我们的社会成见造成了部分女子在这个问题上的不忠诚，但确实不止一个女人承认笔者的说法符合事实。在两到三年的时间内，所谓的处女膜可以恢复四五次，但这种类似修复的情形只会出现在特定的年龄阶段内，通常是14至17岁，少数人是15至18岁。如果身体发育完全之后，所有器官的发育也全部处于正常状态，此时想要恢复处女膜的话，就只有采取特别补救措施，或者使用笔者下面将要论述的方法。

能够恢复处女膜的女孩子相比不能恢复的女孩子，所占比率并不大，因为只要身体出现稍微地不适，如痛经、阴道潮湿或者白带过多，都会影响狭窄入口或褶皱的形成。即使阴道处于持续发育阶段，但因为常常很潮湿，所以不够坚硬，也就无法愈合而形成肉阜、肉环或者褶皱，所以这一类女性，在性交之初被进入时，会感觉到有障碍，但并不会出血。

男人在这个问题上存在着很深且非常荒谬的偏见。一个女孩子如果在青春期之前与男人发生了第一次性关系，并不会对她的贞操有影响，如果她中断性生活一段时间之后，再加上保养得很好，就不会缺失处女的任何一个特征，当她再发生性关系时依然会出血。简单地说，她在失去了童贞之后依然可以是贞女，甚至能够连续几次成为贞女。但在同样情况下，一个事实上的处女，却有可能不会成为贞女，至少在表面上不完全是。因此，男人们应该从这个问题中摆脱出来，不要沉溺于按自己想象所产生的、不公平的怀疑中或是错误的喜悦中。

如果想要得到一个确定女人贞操的明显可靠的方法，我们需要深入到尚未开化的民族中进行观察。这些民族由于无法通过良好的教育来让自己的孩子对操守、道德等有相应的概念，就只能用野蛮的方式确保女孩子的贞操。如非洲、南缅甸、阿拉伯半岛中部以及亚洲的某些民族，在女婴刚刚出生时，就将其身上的生殖器官封闭起来，仅留下一个小口

用于排泄，随着孩子年龄的增大，肌肉被禁锢得越来越紧，等到成婚时，再将它切开；有些民族会用石棉绳对女子施行锁阴术，石棉绳的材质保证了她们无法作弊；而有些民族则会在女子的阴部戴上一个环。为了证明自己的贞洁，女子和女孩都必须接受这样带有侮辱性质的陋习的约束——被迫戴上一个环，其间的区别是，女孩所戴的环无法打开，而女子的环上有一把锁，钥匙掌握在丈夫手中。这些野蛮民族的习俗我们无须再多加列举，因为就在我们身边也在发生类似的事情。在我们这些所谓的文明世界里，对女子的贞操持有的敏感注目，与野蛮民族习俗中粗野的环锁不是一样的吗？

然而，不同的民族在审美观和习俗上都有所不同，人类的思维方式有着很大的差别。一方面，如同我们讲过的，女子的贞洁主观上是由男人创造，并小心翼翼维护的，他们采取各种卑劣的手段来确保女子的贞洁。但另一方面，我们也注意到，有些民族对所谓的贞洁并不重视，反而认为女子被剥夺贞洁所承受的痛苦是一件微不足道的事情。

有些民族因为迷信而将处女献给祭司，甚至把处女当作对崇拜偶像的祭祀品。在印度西部某些部落中的祭司就拥有这种权力，在果阿、加那利群岛，处女自愿或被亲人强迫向身体强壮的人出卖贞操。不过，单从宗教的观点来看，这些民族在这方面的盲目迷信会导致荒淫无度；而宗教中所谓纯人性的观点，鼓励教徒把女儿奉献给他们的长官、主人和国王。在加那利群岛和刚果王国，就有人通过这种方式出卖自己女儿的肉体，但这种行为却不会对她们的名声带来损害。在土耳其、古波斯、亚洲和非洲的某些地区，也有着同样的习俗，国王会把失宠的女人送给自己的臣工，而受此赐予的大臣们会感到万分荣幸。在缅甸阿拉干邦和菲律宾群岛，如果一个男人娶到一个没有失去童贞的女子，他会觉得自己的名誉受到了损害，因此会花钱雇人充当临时丈夫。而在某些地方，有的母亲总是在寻找外乡人，请求他们与自己的女儿发生性关系，甚至为此花费不菲。拉普人也希望自己家的女孩子与外乡人发生性关系，他们认为这是一种对女孩子魅力的证明，因为她们能够取悦比本土人更有鉴赏力的外乡人。在马达加斯加和其他一些国家中，最放荡、最抢手的女人，常常是最早结婚的女人。关于这些发端于野蛮或道德败坏的奇特嗜好，有太多的例子，在这里就无须笔者再一一列举。

男子在青春期之后自然就要结婚，通常情况下，一个男人只能拥有一个女人，好比一个女人只能拥有一个男人一样，这也是自然法则，因为男性的数量与女性的数量相差并不大，理性、人道主义、司法等都对一夫多妻制提出过抗议。如果为了满足一个男人的欲望，就必须以牺牲多个女人的自由和感情为代价，这是不公平的，甚至是残忍而丑陋的做法。

如果与信仰理性和宗教的民族确立婚姻关系，对男人来说无疑是最好的事情，因为他可以充分使用自己在青春期获得的精力。但是，如果他坚持单身，这些精力就会变成他的负担，甚至有时会非常痛苦，因为精液在体内滞留太久会引发疾病。禁欲无论是对于男性还是对于女性来说，或多或少都会引起强烈的生理刺激，以至于理性和宗教的束缚都无法抑制这种冲动，它会令男人变得如同野兽，因为他们一旦意识到这种情况时，就会疯狂且难以遏制。

这种刺激在女子身上则表现为子宫狂躁，随之而来的还有精神错乱，以及毫无羞耻感地开色情玩笑，甚至做出一些下流举动。亚里士多德曾描述过一位小姑娘，笔者把她的行为看作是一种现象：这个小姑娘年仅12岁，有着棕色的头发，面色红润，小巧玲珑，但体态已经显露出丰盈的迹象，她一看到男人就会做出猥琐下流的动作，完全不理会自己的母亲在场，也不顾别人的指责，甚至连惩罚都无法阻止她。而这个女孩子并不是失去理智，因为她与女人在一起时，这种令人不齿的行为就会消失。亚里士多德认为，这个年龄段是生理欲望最强烈的时期，需要对女孩子做小心翼翼地管束。这种现象还与其生活的环境有着一定的联系，在气温比较寒冷的地区，女性表现出这样强烈欲望的时间通常比较迟。

不过，多数女性在正常情况下会让这种生理欲望顺其自然，至少也是平静地对待。同样，也有一些男人认为所谓的贞洁并无任何价值。笔者认识一些以身体健康为乐的人，他们在25岁或者30岁时，并没有因为自然本能而产生强烈的欲望，因为他们会用各种方式来满足自己的欲望。

此外，与禁欲相比，纵欲带来的危害更让人担忧。许多荒淫无度的

男人证明了这一点，有的人因此失去了记忆，也有的人失明，还有的人不断脱发，甚至是虚脱而亡。但是，就算智者也无法过度对年轻人做出警示，让他们了解到自己在健康方面所犯的不能弥补的错误。有多少人会在30岁之前不去充一下做男人的威风？或是不显示自己的雄性特征？又有多少人在15岁到18岁这段时间就染上难以启齿的不光彩病症？

第三节 习俗对女性的压制

在一群人中，有时总会出现一些力量非常大的男子，但这在文明社会中仅仅是一项微不足道的优势。因为在这里，精神比体力重要得多，体力劳动只是社会底层的人才会从事的劳作。不过，如果在自卫或是做有益的工作时，这个优势将会变得珍贵得多。

就算这样，力大无穷的男人在文明社会中也并非出类拔萃，因为随着科学技术的进步，即便是柔顺的女子也同样可以承担起原本只有男子才能担负的职责。虽然女人的力气要比男人小很多，但这在一定程度上也似乎能转化为一种优势。男人凭借力量所做的最大的事情，通常也是他们最大的恶习，以暴力手段奴役或者对待另一个性别的人类——生来就与他们一起承担生活苦乐的女人。

这些野蛮的男人强迫自己的女人不停地劳作，让她们种地、做苦力，而他们自己却舒舒服服地躺在吊床上休息，即便离开吊床也只是去打猎、捕鱼，甚至无所事事地站立一段时间。因为野蛮人不懂得什么是散步，如果他们看见我们来回踱步会觉得非常奇怪，这是因为他们想象不出我们为什么要做这些在他们看来毫无意义的运动。所有男人都喜欢偷懒，而热带地区的野蛮男人是最懒惰的，他们对待女人也最为凶狠，总是用苛刻的态度要求女人服侍自己。这些没有开化的民族中的男人更像是野蛮人，为女人制定了一系列粗野的习俗和不公平的法律。

在开化的民族和文明的国家中，女人尽管能获得与男人平等的条件，但只是文明社会的自然性和必要性决定了这种平等。女人是平和与温柔的象征，她们反对暴力，通过自身的谦逊让人们意识到，美的力量

要远远大于残暴的武力。但是，要发挥这种美的力量需要一定的技巧，因为不同民族对于美的认知是完全不同的。我们有足够的理由相信，女人善于取悦人的能力要比大自然的恩赐重要得多，虽然男人对美的看法各不相同，但他们对渴望的事物的价值观却是很一致的，他们都认可越难得到的东西价值就越高。女人一旦懂得自重，知道拒绝那些不是为了感情，而是为了其目的追求她们的人之后，女人才会变得更美。

古人的审美观与现代人并不相同。在古人看来，前额和面庞都小巧，眉毛紧连到分不开的程度，才是美丽女性的标志。如今的波斯地区，人们依然认为相连在一起的粗眉才是女性美丽的主要特征；在印度的某些地区，人们认为黑色的牙齿和白色的头发是美的象征。也许就是这个原因，在马里亚纳群岛生活的女人们，其主要活动之一就是用一些草药把牙齿染成黑色，用某些特定药水将头发染白。在日本等东部亚洲国家，脸似银盘，眼如丹凤，鼻子扁塌且宽，脚纤细以及肥大的腹部等都被认为是美的主要表现。美洲的印第安人会把孩子的前额和后脑勺绑在木板之间挤压，从而令他们的脸比天然生长的更宽大；也有一些民族会把孩子的头压平，再从旁边使劲挤压把它拉长；还有一些民族将孩子的头从头顶向下压，将他们的头压平；还有些民族会想办法让孩子的头尽可能变得比自然生长的圆。不同民族对美有着不同的看法，甚至每个人对此都有自己的特别喜好或观点。这种审美观可能与人们在儿童时期获得的对某些事物的最初印象有关，又或者是与某些习惯及偶然性因素相关。

第三章 论人

在对人一生的发展阶段以及丑陋的社会习俗带给人们的迫害和压制进行讲述之后，布封继续向我们仔细描述人的表情、本能、双重性格等特征。他指出，认识和了解自己是非常有用的，尽管我们不清楚对自身以外的事物是否有着更充分的认识，但只有我们认清了自己才能更好地认识社会，了解自然。布封在这一章中提出，人所有的内心活动都可以从面部表情中表现出来；人的生命和灵魂都存在于物质中；人具有双重性，而这种双重性来自于人的天以及与它们行动相反的精神实质。

第一节 人的表情

人们假如突然想到一件热烈渴望或深感遗憾的事时，会感觉到体内产生一阵颤抖或者抽搐。这种运动来自于肺部——肺部提起，引发深呼吸，当人们感受到了这种激情的形成，却发现现实不能满足渴望时，就会不停地叹息，如此一来，表现内心痛苦的悲伤就会紧接着出现；当内心的痛苦开始沉重，就会产生眼泪。

当空气通过肺部的抽动而进入胸腔，再通过抽动形成停不下来的叹息，此时每次吸气都会产生比叹息更响的声音，这就是我们所说的抽泣。相比叹息声，抽泣声的交替频率更快，其中还夹杂着一些嗓音，但这种嗓音在呜咽呻吟时较为低沉，这时候连续的抽泣声、呼气和吸气声都会很缓慢，模糊不清的呜咽声反反复复，随着悲伤、痛苦、沮丧的程度不同，这种声音或长或短，但总会重复若干次。吸气时间是指呻吟时的空隙，这种时间的间隔通常情况下是相同的。号哭是放声用力地呜咽，几乎是保持同一个音调，特别是在尖声叫喊时。当然，有时候也会以低音结束，出现这种情况时，多半因为已经哭到筋疲力尽了。

笑声实际上是比较突然的声音，断断续续的，它的形成是因为上腹

急剧起伏所引起的扭动。有时为了方便发笑，人们需要将头低下并前倾，收缩胸部，保持不动，嘴角向脸颊两边张开，而脸颊收缩并鼓起。在大笑和其他剧烈的表情中，嘴唇都会张得很开；但如果心情平静，嘴角就只是微微翘向两边，嘴唇也不会张开，只有面颊出现轻微地鼓起。也有一些人的脸颊在距离嘴角不远的地方，会出现凹陷，这就是我们俗称的酒窝。酒窝常伴随赞赏或是感激的微笑出现。微笑显示了内心的满意、亲和及满足，但有时也是出自内心的嘲讽、轻蔑的表现。狡猾的微笑常伴随着上唇紧抿下唇的动作。

脸颊是一个不能产生动作的部位，除非是在某些感情的影响下，会下意识产生红润或者苍白，此外就没有其他表现了。脸颊的主要作用是形成脸部轮廓，是人的相貌的重要组成，更多的是衬托下颌、耳朵和额头的美。

人在感觉到耻辱、愤怒、骄傲或高兴时，面部会有红晕产生；而在感到害怕、惊吓和悲伤时，脸色会变得苍白，这种交替的变化是不被控制的，它是人内心活动的体现和表达，因此属于不受意愿支配的情感现象。但是，意愿有时也是能够支配其他表情的，因为片刻的思考间就能有情绪的转换，甚至让脸部肌肉的运动停止，然而，脸色的变化却是无法阻止的，因为脸色取决于主要器官隔膜所引发的血液运动，而内在情感可以决定隔膜作用。

头部在各种情绪中会出现不同的姿势和动作，谦虚、羞愧、悲伤时向前倾；疲惫、可怜时歪向一边；自负时向上抬起，固执时挺直不动；惊讶时朝后仰；轻蔑、嘲讽和生气时反复摇晃等。

人们在表现悲伤、高兴、羞愧或表达内心的爱慕、同情时，眼睛会一下子鼓起。如果情绪变化过于丰富，会使眼睛张大，视线因此变得模糊，有时甚至会流泪，不过，流泪的时候，由于面部肌肉的压力，嘴巴会同时张开。自然反应的情绪也会令人的鼻子发生变化，眼泪通过内通道流进鼻子中，并以一种断断续续的状态不均匀地流淌出来。

人在感到悲伤时，嘴角会下垂，下唇上翘，眼皮也挤到中间，瞳孔向上但被眼皮遮住大约一半。脸部的其他部分比较松弛，造成嘴角到眼睛的间隔比平时大一些，看起来就好像脸变长了。

人在感到害怕、惊慌、恐怖时，额头会皱起，眉毛竖立，眼睑睁大，露出被下眼皮挡住部分的下垂瞳孔，以及上面的一部分眼白；同时，嘴巴会张开，嘴唇收缩，露出两排白牙。

人们在表达嘲笑和轻蔑时，上唇会向一边翘起，牙齿露出来，另一边则类似于微笑时的动作，鼻子向嘴唇翘起的一边皱缩，嘴角后拉，同一侧的眼睛在这个时候几乎闭起来，另一只自然张开，但两只瞳孔都下垂，好像在俯视着什么。

当人们表示内心的嫉妒、狡猾、羡慕时，眉毛会往下皱在一起，眼皮上扬，瞳孔向下，上唇向两边翘起，嘴角略微下垂，下唇中央部分向上突出，与上唇的中央部分相碰。

人在笑的时候，嘴角会向后收，轻微地向上扬起，脸颊的上半部分向上耸，眼睛似睁似闭，上唇向上翘起，下唇则向下垂，嘴巴张开。大笑时，鼻子上的皮肤也会随之皱在一起。

臂膀和手，甚至身体的多个部位都能表达情感，肢体表现出来的姿势和脸部运动同样能表达内心活动。如高兴时，眼睛、头、手臂及整个身体都会变化；悲伤、疲惫时，眼睛向下，头歪向一边，手臂下垂，整个身体一动也不动。

情绪的第一反应是独立于意志之外的，但有的反应仿佛是由精神意志所决定，它使眼睛、头、手臂、身体共同做出反应，这些反应同样是内心为了保护身体而做出，至少是为了满足情绪的需要，而且这也是能独立将情绪表达出来的附带信号。例如，人在表达爱慕、渴望、希望时，头部向上抬起，眼睛也向上看，似乎在乞求得到渴望的某种东西一样。而如果头部和身体都向前倾，表现出向前行进的样子，则似乎是拥有了接近自己渴望的东西的特权，或是伸出双臂拥抱它、抓住它。相反，人在害怕、仇恨、恐惧时，常会迫不及待地伸出双手，不自觉地转动眼睛和头部，慢慢向后退，似乎要推开引发惊恐的东西一样。这些动作好像是不由自主，突如其来的，但这其实是人关注事物的习惯，因为思维决定了这些动作，身体各个部分只是在执行思维命令。这也是人体灵活性的表现。

人类所有的外在情感都是内心活动的反映，而且大部分都与意识表现有关，所以它们能够通过身体运动表现出来，特别是面部表情的变化。因此，我们可以通过一个人的外在表现来判断他心中所想。通过观察面部表情的变化，窥视他的内心活动。但内心活动与外在的物质形象没有直接的关系，因此不能只通过一个人的身体曲线或者面部线条来断定他的内心，丑陋的外表也可能有一颗善良的心。我们不能通过面部轮廓或相貌的美丑判断一个人品质的优劣，因为外部线条与内心世界毫无关系，也没有可以建立合理推测的相关之处。

不过，古人似乎对这种明显具有偏见性的观点很喜欢，各个时期都有许多人在研究所谓相貌知识的占卜术。显然，这些关于相貌的知识是通过被观察者的眼睛、脸部特征以及身体动作来推测其内心活动，而鼻子和嘴的形状并不能对内心活动和性情的形成产生影响，就好比四肢的状况不能反映人的思想一样。一个人有着挺拔的鼻子是否代表他更有才智，而小眼睛、大嘴巴的人就比较愚笨呢？因此，我们必须承认，所有的占卜家做出的预测对我们几乎毫无价值，通过所谓的相术观察得到的结论其实是非常荒谬的。

第二节 人的本性

对人类来说，认识和了解自己总是有益的。大自然虽然赐予了我们各种器官，但它们只不过是我们感知外部世界的工具；尽管我们努力探索超越自我的存在，却忽略了自身所拥有的丰富的内在感觉。其实，假如我们想要真正了解自己，就必须对这种内在感觉加以重视，因为它是我们进行自我判断的唯一方法。不过，我们似乎已经习惯了忽视这种感觉，哪怕它一直存在于人体的感官中，是我们的各种欲望让感官的生机趋于消逝，而让它变得毫无生气。

但是，由永恒的物质和稳定的物质构成的人的本性是始终存在的，即便有时候太阳光会被乌云遮住，它的力量也不会失去，会一直为我们指引方向。将这些指引我们前进并照耀我们的光芒聚集起来，周遭围绕着我们的黑暗就会消退。前方的道路或许不是一片光明，但在我们前进

的过程中总会有一把火炬引导方向，避免我们误入歧途。

在认识自我的过程中，人类遇到的最大困难是明确组成人类的两种物质的本质：一种是无形的、非物质的，且永恒不灭；另一种是有形的、物质的，且必然消亡。两者之中，我们如果肯定一种而否定另一种，这种否定于我们并没有特别意义，这些否定不能体现正确、积极的观点。我们首先需要明白非物质的存在本质，是简单的、不可分割的，而且只有一种表现形式，只能通过思想表现出来；而物质的存在是可以接受感觉的一种形式主体。两者都像器官的本性一样非常稳定，但也有着很大的差别。为了对两者有初步的认识，需要我们赋予它们充分真实的属性，然后再对它们进行比较。

即使我们很少考虑自己的知识来源，也不可否认，我们只能通过比较的方法获得知识。那些不能进行比较的东西，一般也是难以理解的东西，比如“上帝”这个概念就属于无法被理解的，因为“他”没有进行比较的对象。不过，所有能够进行比较，能够通过不同侧面进行观察的，以及可以进行相对思考的，都在我们的知识范围内，越是容易被比较，且可以通过不同侧面进行观察的事物，我们认识了解它的方法就会越多，也越容易综合多种观点，然后在此基础上形成自己的判断。

灵魂的存在是已经被我们证实的，又或者说，灵魂与我们本就是一个整体，对于我们而言，存在和思考就是相同的事情，与其说这个真理是深刻的，不如说它是凭借直觉得到的。灵魂独立于我们的意识、想象、记忆以及其他能力之外，在那些积极思考的人们看来，身体和外在事物的存在都是存疑的。因为被称之为身体的，由长、宽、高组成的形体，似乎亲密无间地属于我们。然而，除了与意识有关之外，它们还与什么相关呢？我们感觉到的物质器官是原本就这样呢，还是为了适应影响它们的物质而逐渐转化成了现在的样子呢？我们的内在感觉或者说灵魂，与外在器官的本质又有何相同之处呢？通过光亮或声音刺激所引起的内心感受，是否又与传播光亮的物质或声音形成的振动相似呢？事实上，我们的眼睛、耳朵需要适应那些作用于两者的物质是必要的，因为感官的本质与这些物质的本质相同，只不过每个人的感受有所不同而已。这一点似乎已能够证明，灵魂实际上和物质的本性存在不同。因此，我们认为内在感受与引起感受的东西有着巨大的区别。

我们已经知道存在于我们周围的一些事物的本质，它们与我们的判断完全不同，因为感受与引起感受的东西没有任何外在形式上的相似。所以，我们可以得出这样的结论：引起感受的东西的本质，与我们想象中的截然不同。但我们对自己存在的真实性是肯定的，当我们意识到物质只是灵魂的一种表现方式或观察方式时，肉体的存在就显得非常可疑。当我们的身体不再存在时，对于灵魂来说，一切引起我们感觉的物质也就不复存在了。

我们虽然无法证明灵魂的存在，但依照一般的观点，我们可以认为灵魂是存在的。当我们把物质和灵魂进行比较时，将会发现，它们之间的区别非常巨大，对立也如此明显。因此我们有理由认为，灵魂具有独一无二的本质，而且属于一种至高无上的范畴。

第三节 人的双重性

人类具有双重性这一点是一般存在的，这种双重性由人的天性以及与其行动截然不同的两种本原组成。在这两种本原中，最重要的是精神本原，即灵魂，它总是与另外一种表现为纯物质的本原（动物本原）相对立，是所有意识的本原。笔者认为，对于前者而言，是与安详纯洁的光辉共同存在，它来自于科学和理性，因此也是与智慧并存的；而后者则如同一股迅猛奔腾的、引发欲望或错误的情绪的激流。

不过，纯物质本原（动物本原）是先于精神本原发展起来的，因为从本质上，它就存在于与人类欲望相似或相反的事物中，存在于人类内在物质感官引起的印象的运动和更新过程中。动物本原的作用会在我们的身体感到快乐或痛苦时体现出来。首先，它在身体上表现之后，我们很快能意识到它的出现，在这一点上，精神本原相反表现得比较迟，因为精神本原只有受到教育才能得到发展，并变得完善。特别是在儿童的部分更明显，只有当与他人进行思想交流时，他们才能获得精神本原，并逐步发展成为一个具有思维能力且较理性的人。如果一个人只能根据物质本原的内在感觉来做身体上的行动，缺少甚至没有思想上的交流，那么他可能会变成一个傻瓜或者一个怪物。

让我们接下来对一个不被老师监督、生活自由的儿童进行观察。通过他表现出来的外在行为，我们可以对他的内心活动做判断。事实上，我们发现，这种情况下的儿童，他们的一切想法都毫无顾虑，他们的成长是快乐而随心所欲的，他们对外部事物的印象都是其内心的真实反映。通常情况下他们不会因为什么大的理由而异常激动，常常没有目的、没有计划，就像那些幼小的动物一样自由地玩耍，尽情地撒欢，因此他们的所有活动都是无序而随机的。不过，有时候他们也会装出一副规矩的样子，并且对自己的行为加以适当控制，之所以会这样，是因为他们会受到那些教会他们思考的人提醒，他们变得规矩也是想要表明他们记住了与人们交流时得到的经验。因此，可以这样认为，物质本原在人类的童年时期占据了主导地位。由此，我们也得出，如果不能在孩子的童年时期给予他们在精神本原方面的教育发展，或者说不能促使他们的精神本原不断运作，那么，在他接下来的人生中物质本原将会占据主要地位，这种情况一旦出现，这个人将会不受约束而径直行动。

当我们进行自我反省时，很容易清楚地意识到物质和精神本原的存在。人在一生中，经常会有片刻或者是几个小时，甚至是几天、几个季节，我们不仅可以清楚意识到两种本原的存在，还能够感受到它们在行动中的相互矛盾。与此同时，我们总是做一些不想做的事情，却难以自控。我们接下来讨论一下这些令人烦恼、厌恶的时刻，以及被我们称为“头晕”的症状。当人们受到这种状态的影响时，往往无法在工作上集中注意力，有时甚至会感觉无所事事。如果我们认真观察，就会发现此时的自己似乎被分成了两个。其中一个具备理智能力，另一个则具有想象力和幻想力。前者指挥着后者的一切行动，但在某些时候，前者好像又无法阻止后者决定进行的一些事情。相反，代表感性的后者在很多时候总是能约束前者，并进一步战胜前者，好比我们有时候很想行动，但始终没有行动一样。这也是为什么我们的思想和行动无法一致，甚至会截然相反的原因。

当人们能心情平静地照顾自己、朋友以及亲人，并熟练地处理各种事务时，表明他此时的精神本原占据了主导地位。然而，我们也清楚地意识到，另一种本原并非消失不见，它会在我们漫不经心时表现出来。当动物本原占据主导地位时，我们不仅难以思考占据我们身心的事务，

还会放任自己的欲望、情感和嗜好。在第一种情形下，我们有能力随心所欲地发号施令；而在第二种情况下，我们就只能服从他人。正常情况下，只有一种本原处于行动状态，而且这种行动并不是与另一种本原相对立的。这个时候，我们感觉不到任何内在的矛盾，“自我”也似乎变得非常简单，因为我们只能体会到一种单一性的简单冲动，而这种单一就是我们的幸福。但是如果稍微深入思考，我们就很可能会指责自己所谓的快乐，或是在欲望的控制下，仇视理智，此时的我们不再感觉幸福，因为我们已经失去了生命中原有的平静和统一性，内心的矛盾也再次产生。两个相互对立的“我”产生，两种本原相互感受，从而滋生疑惑、焦虑和悔恨等情绪。

综上所述，当主宰人类本性的两种本原同时处于剧烈运动，且两者势均力敌时，是人最痛苦的时刻。这个时候的人，内心会产生对生活的厌倦情绪，当这种状态愈发强烈时，会将人内心的希望念头掐灭，甚至导致自我摧毁，疯狂在此时就变成了对付自己的利器。

这是一种相当可怕的状态！笔者用黑色对它进行描绘，是因为这种状态相较其他阴暗色调确实更加让人产生恐惧。不过，也需要指出，在所有与之相似的情况及与其平衡类似的状态中，两种对立本原几乎很难自我克制，它们会同时出现，并显示出几乎相等的运动力量，这种情况常让人心烦意乱、犹豫不决，甚至是异常痛苦。在这种状态下，我们的身体会因内在的混乱斗争而备受折磨，层层重负之下，身体逐渐衰弱，或在由这种状态下产生的激动而慢慢枯竭。

回过头来看，当两种本原处于统一状态时，我们会感觉到幸福。童年生活是幸福的，因为这个时候人的意志被动物本原支配着，而且它会不停督促我们把想法付诸实践。对于儿童来说，责骂、处罚、约束都只是小小的忧伤，因为儿童对这些感受只不过是肉体上的疼痛而已，很快会过去，其存在的本质丝毫不会因此受影响。一旦得到自由，他就会重新获得由新鲜感受带来的行动上的快乐，如果此时他放任自己，就会觉得无比幸福，只是这种幸福是短暂的，转瞬即逝，甚至会随着年龄的增长而产生痛苦。因此，成年人会对儿童的行为进行约束，虽然他们会为此伤心，但这种痛苦是暂时的，而且对于儿童来说这种痛苦也是很有必要的，因为这将造就他们未来的幸福。与长久的痛苦相比，相对短暂的

痛苦并没有什么不好。

到了青年时期，精神本原开始发挥作用，并逐渐控制我们的意志时，就会产生一种新的物质感觉。此时，精神本原占据了主要地位，拥有绝对支配权，可以专制地指挥我们的感官，同时，精神本身也会愿意服从由这种物质感觉所产生的狂热欲望。尽管动物本原依然发挥重要作用，甚至相对以前更加有力，不过事实上，动物本原在将理智当作另一种方法为自己所用时，也一定程度上削弱和制服了理智。而且人们往往为了满足和认同自己的欲望，才进行思考或者行动，一旦这种兴奋被延续，人们就会有幸福感，因为在此时的状态下，矛盾和外部痛苦加强了内在的统一性，同时还加强了欲望，在填补因疲惫造成的空隙时又唤醒了骄傲，让我们的视线转移到同一个事物。这时我们所有的能力，都指向了同一个目标。

不过，这种幸福感会很快结束，如同一场梦一样。之后无尽的厌倦和可怕的空虚将替代内心丰富的感情。同时，刚刚走出麻木状态的心灵重新变得难以认识自己，它在奴役之下失去了支配的欲望，丧失了原有的指挥力量，逐渐变得仇恨受奴役，并开始寻找一个新的主宰以便转移这种痛苦，这样人就会产生一个新的但转瞬即逝的欲望目标，以取代另一个存在的短暂目标。人们在这种状态下，内心的暴力和厌倦在不断增加，快乐自然会随之消失，进而影响到身体健康，器官日益衰竭。我们不禁产生疑问，经过了这样的青春期之后，我们还留有什么呢？余下的仅有虚弱无力的身体、伤痕累累的心灵，以及满满的对受伤身心的无奈。

如果仔细观察，我们还会发现一个问题：人到中年时更容易出现我们在前面讲到的身心疲惫、情绪郁结等症状。我们认为，造成这种状况的原因是：尽管这个年龄时期的人们仍然在追求青春时的快乐，但这种追求往往是因为习惯而非本身的需要。随着年龄的增长，我们感受到快乐的时间越来越少，而无力享受快乐的时间却逐渐多起来，此时的我们总是处于自我批判中，或者因为自己的弱点而感觉羞愧，因此，我们开始不由自主地对自己责备，不满自己的行为，甚至谴责自己的期望。

此外，这个时期的人们渐渐对自己的现状产生不满，烦恼日益增

多。通常来看，到了这个时期，人们已经获得了一些社会地位，换句话说，就是人们碰巧或者是有选择地进入某个职业领域。在这个职业领域中，他总是害怕自己不能完成某项工作，尽管如此，还是冒着危险努力去完成。于是，人们不断徘徊在蔑视和仇恨的巨大矛盾中。为了避开这两个矛盾以及它们产生的不良影响，人们将自己折腾得筋疲力尽，越来越虚弱，最后向其妥协。如果一个人的人生阅历足够丰富，同时又充分体会了人类的不公平，那么，他们会将职业习惯性地当作人生当中必须经历的磨难，当人们慢慢习惯了少说话多休息，开始对别人的打击对自己造成的伤害不再介意时，就会顺其自然地进入冷漠处事、麻木不仁的状态中。

对于人类而言，荣誉是一切伟大心灵的推动力，但它只能通过光荣的行动和有意义的工作才能达成和获得。而现在，对于那些轻易就能获得荣誉的人而言，荣誉正在逐渐失去它的魅力；荣誉的吸引力仅限于那些与它有着遥远距离的人，但对于这些人来说，荣誉又是有些虚幻的东西。懒惰有时会占据上风，它让人们觉得似乎有了更方便的途径和更实惠的好处，不过很快厌倦又会取代它，随之而来的是无聊的时光。可以毫不掩饰地说，无聊是一切思想灵魂的杀手，只有疯狂才能与之抗衡，哪怕是智慧，对它而言都束手无策。

第四章 人的感觉

法国的启蒙运动是在唯利主义哲学的基础上逐渐发展起来的，著名的哲学家笛卡尔认为，唯利主义是以人的理性代替神的启示，以分析论证代替盲目信仰。这个观点为启蒙思想运动奠定了基础，在那个时代有着非常重要的意义。布封也是18世纪著名的启蒙思想家，他认同并实践了笛卡尔的论述，不仅勇于与虚伪的神学抗争，还通过细致的探索，对人类的发展过程进行了阐释。在这一章中，布封描述了人类感觉的形成及传递，还特别对老年的幸福感，即对长寿的体验进行了论述。

第一节 第一个人最初的感觉

因为建立在其他感觉上的认识往往是错误的，所以，我们需要借助触觉来获得完整和真实的知识。那么，这种重要感觉是如何发展起来的呢？最初的知识是如何深入我们内心的呢？又或者说，我们是否忘记了在懵懂童年时期发生的一切？如果我们连追根究底的勇气都没有，那么我们又怎么寻找思想最初的痕迹呢？我们是否能够轻而易举地提升到这个阶段呢？如果事情不是那么重要，我们还能找到理由原谅自己的懈怠，但当它比其他所有事情都重要时，我们难道不应该为此做出努力吗？

笔者因此构思出这样一个人：他是开天辟地之后地球上出现的第一个人，他的身体和器官都已经成形，但对自己和周围的一切却毫无认知，那么他最初的活动、判断、感觉是怎样的呢？假如这个人想要对我们讲述他自己最初的思想，他会说些什么呢？他会有一个怎样的故事呢？为了让事实更容易理解，笔者必须让他“开口说话”。接下来的这篇哲学叙述，篇幅不长，但不是偏离主题或无用的内容。

我回想起了那个让我既喜悦又困惑的时刻，当时我第一次感觉到了

自己奇异的存在，我以前并不知道自己是什么、在哪里，更不知道自己来自何方。我睁开眼睛，这是非常奇妙的感受！广袤的苍穹、辽阔的大地、奔流的河水都吸引着我的目光，令我充满活力，给了我一种说不出来的快乐感觉。一开始我以为所有的事物都是我身上的组成部分。我最初的思考让我对这种刚萌发的念头深信不疑。当我直面太阳时感受到刺眼的阳光，不得不紧闭眼睛，感觉到一阵轻微的疼痛，当闭上眼睛的瞬间，我以为自己失去了自我的存在。

我为此觉得非常诧异，认真想着这巨大的变化。突然，我听到了外界的声响，鸟儿在歌唱，微风在私语，如同一场音乐会，这样的感受让我激动不已。这些声响一直传达到我灵魂的深处，我仔细聆听了很久。

我聚精会神地感受着这种新的存在方式，当我再度睁开双眼，我已经忘记了阳光，就是我最初认为的组成自己存在的另一部分。我为自己可以拥有这么多东西而感到高兴，此时我的快乐已经超过了最初感受到的一切，有一瞬间，我连那些动听的声响都忘记了。

我仔细观察那些不同的事物，很快就意识到我可以失去或是重新找到它们，而且我也有能力摧毁和重造这些美丽的事物。尽管由于光线多变和色彩的不同，令它们显得伟大，但我相信这一切都是组成我存在的一部分。

我开始对这一切报之以漠然的注视，并冷静地聆听。这时一阵微风拂过，我感受到它带来的凉爽和大自然的芳香，这在我的内心产生激荡，也使我有了自恋的情绪。

这些感觉激励着我，在一种难以言喻的快乐存在的驱使下，我突然站了起来，感觉自己被一种陌生的力量包围。我刚跨出第一步，新处境就让我异常惊讶，不敢再随意走动，我以为自己的存在发生了变化。我轻微的行动打乱了事物，令我以为一切都因此混乱。

我把手放在头上，触摸到我的额头和眼睛，接着我对自己的身体做了全面的触摸，这时候我发觉手似乎成了我生存的主要器官。这部分的感受是如此清晰和完整，相比阳光和声音带给我的快乐，它们更加完美。我非常依恋我实实在在存在的这部分，于是，我感到自己的思维有

了深度和实在性。

我在自己身上摸索到的一切让我的手似乎越来越灵活，每次触摸都会在我的灵魂深处产生双重的念头。

不久之后，我就发现这种感觉能力在慢慢扩散到我生命的各个部位，而我逐渐意识到原本认为巨大无比的身体的局限性。

我曾经对自己的身体进行观察，认为它的体积如此巨大，其他在我周围出现的事物与之相比不过是小小的点缀。我快乐地看着自己，眼睛跟随着手，观察它的每个动作。我对这一切有着特殊的感受，我认为手的动作只是存在于一瞬间，并且是一系列类似的东西；我把手慢慢靠近眼睛，它显得比我的身体还要大，挡住了我眼前的其他东西。

我开始怀疑那些通过眼睛观察到的感觉是不是某种幻觉，我曾经清楚地意识到我的手只是我身体的组成部分，我无法解释它为什么会一下子变得无比巨大，因此我决定只信任不会欺骗我的触觉，而对其他的感觉和存在保持谨慎的怀疑态度。

这样的态度对于我来说是有益的，我再次主动迈开步，抬头挺胸前进，结果不小心撞在了一棵棕榈树上。因为产生了恐惧，我把手慢慢放在对我来说是奇特的树干上，我认为它是陌生的，因为它并不会回应我的感觉，我怀着几分恐惧从它旁边绕过去，这是我第一次意识到在我的身体之外竟然还存在着其他某种东西。

这个新发现再次让我激动不已，心情久久无法平静。在对这一事件进行反复思考之后，我得出结论，对外界事物的判断如同判断自己的身体一样，只有依靠触觉才能确定它们的存在。

因此，我试图去触摸我看见的一切东西，我想要触摸太阳，但当我伸出手臂去拥抱时，却只感到空气中的虚无。

我尝试用各种方式进行触摸，但得到的结果却让我更加惊讶，因为所有事物看起来都似乎与我有着距离，当我经过一系列体验之后，才学会了用双眼指挥双手去体验事物。我通过手获得的感觉，与其他方式获得的感觉不同，而且其他各种感觉没有这样的协调性，因此我的判断应

该是存在着某种缺陷，我想，如果离开了触觉，我的存在就只是模糊的混合体罢了。

我思考得越多，发现的问题也就越多，这些问题困扰着我，由此引发的思考将我折磨得非常疲惫，于是我把双膝弯曲起来，让自己处于一种平静的状态，这种状态赋予了我的感官以新的力量。

我坐着的地方是一棵大树下，树上结满了殷红色的果实，在枝头摇摇欲坠，于是我用手轻轻地触碰这些果实，它们很快就掉落下来。

我抓起一个果子紧紧握在手中，想象着这是自己的第一次征服行为。对于自己的手能够包容其他有生命的东西这件事，我感到惊讶的同时也颇有些自豪。虽然果子并不重，但这是一个完整存在的生命，这让我产生了一种战胜它的欲望。

我把果子放到眼前，仔细观察它的大小和颜色。我闻到了果子甜美的香气，我把它放在唇边尽情吸取它的芬芳。这些气味令我的嗅觉产生了极大的快感，我的心似乎被这种香气填满。我把果子含进嘴里，这时我感觉拥有了比之前还要甜美和柔和的芬芳，我慢慢品尝起来。

多么香醇的味道啊，又是多么神奇的感觉！我的心中在这个时候充满了快感，这种甜美味道带给我无法言喻的享受，进而引发了占有的念头，我觉得果实这种物质已是我所有，是我改变了它的生命，我是可以驾驭它的主人。

我因为拥有了这种能力而觉得非常自豪，在这种快感的鼓舞和驱使下，我又摘下了两个果子，并意犹未尽地用自己的双手满足自己的味觉。但渐渐地，一种疲惫的感觉开始侵占我的整个器官，麻痹我的四肢，导致我的灵魂停止了活动，让我变得既迟钝又慵懒，周围的所有事物在我眼前变得模糊起来。感觉我的眼睛正在逐渐失去作用，眼皮控制不住地合在一起，头部也无法再依靠肌肉继续支撑，于是，它歪倒在了草地上。

一切都变得模糊不清，并逐渐消失，我的思维中断了，我存在的感觉也开始丧失。我沉沉睡去，却不知道睡了多长时间，因为我的心中并

没有时间的概念，无法进行估算。对我而言，苏醒无疑是再一次的重生，我只觉得自己曾经失去了自我的存在。我被刚刚出现的这种萎靡状态吓坏了，甚至觉得自己无法永远存在下去。

与此同时，我还有另外一种担忧，我不知道自己在睡眠中是否会丢失身体的某个部分，我尝试着，想要重新认识自己。

不过，当我检视自己的身体时，确定它依然是完整的存在，更让我讶异的是，我的身边有一个与我相似的形体。我把这个形体看作是另一个我，我猜测在我停止存在的时候，不仅没有失去什么，还得到了一个意外的惊喜——自己的复制品。

我用手触摸这个新生命，这是一件令人激动的事情，尽管“他”不是我，但却比我还完美，远远胜过我。因此，我以为自己的生命将出现新的转换，从一个完全的我逐渐转向另一个我。

我能感觉到“他”满满的活力，在我眼中“他”逐渐有了意识，“他”的目光让我感到新的血液在血管中流淌。我愿意给予“他”我生命的全部，这种强烈的欲望令我感觉无比充实，第六种感觉就此产生。

太阳这时候慢慢下落，消失在地平线下，结束了它在这一日的运行，我立即发现失去了视觉。我存在的时间已经太长了，因此，我不再对停止存在感到恐惧，也不会因为身处黑暗而再次想到我的这次沉睡。

第二节 感觉的产生及传递

无论肌肉的运动和感情的传递是由什么物质引起的，它一定是通过神经系统来传播感觉的。这种物质可以在非常短的时间内传播，从敏感的系统一端传递到另一端，它的运动方式是以某种形式形成的，可以是通过类似于橡皮筋的振动，也可以是类似于电的传播方式，甚至可以通过类似于细小火花的方式。

这种物质存在于所有的生命体中，并通过心脏和肺部的运动、血液

的循环，以及外部因素对感官的影响，源源不断地再生。可以确定，神经和脑膜是动物上唯一的敏感器官，它们的血液、淋巴等流体以及脂肪、骨头、肌肉等固体相对说来都不够敏感。脑髓似乎也不是敏感物质，因为它只是一种柔软而无弹性的物质，既不能传播，也不能进行运动和感情的传递。不过，脑膜是非常敏感的，它是全部神经的套子，在大脑中形成神经分支，一直扩展到神经最小的末梢。这些末梢是扁平的神经，与大脑神经同属于一种物质，并有着相似的弹性，是敏感系统中重要的组成部分。如果我们认为感觉中枢在大脑部位，那么，脑膜是起决定作用的，而不是完全不同的脑髓部分。

有些人认为感觉中枢和敏感中心都在大脑中，那是因为他们觉得作为感情器官的神经都通到脑髓，就将它当作是唯一能够接受振动和感受的部分。他们仅凭这样的认知就去证明大脑是感情的根源，是感觉的主要器官或共同的感觉中枢。然而，只要了解大脑的构造，我们就能明白，感觉中枢的松果体和胼胝体里并没有包含任何神经，它们周围都被不敏感的脑髓物质布满，神经与感觉中枢也被这些物质隔开，从而导致它们接收到的运动信号不同，所以这个假设也就不成立了。

不过，这个既重要又基本的部分的作用是什么呢？不是所有动物都拥有大脑吗？不是有着丰富感情的人类、四足动物、鸟类的大脑，要比那些少有感情的鱼、昆虫和其他动物的大脑更大、更重吗？在大脑受到挤压时，动物身上的所有运动及反应不是都停止并中断吗？如果这个部分不是运动的根源，那么它们的作用又为何如此重要呢？为什么在动物身上，它的大小和动物情感存在比例关系呢？

笔者相信自己能够找出这些问题的圆满答案，不管这些答案多么难以得出。大脑只不过是分泌和提供营养的器官，而并非感觉中枢和感情根源，但这个器官有着非常重要的作用，如果没有它，神经的生长和生存就没有办法维持。在人类、四足动物和鸟类身上，这个器官比较大，因为这些动物身上的神经数量比鱼类、昆虫要多。正因为如此，鱼类和昆虫的感觉才比较弱，它们的大脑容量很小，并且与之对应接收大脑供应养料的神经数量也很少。但是，笔者在这里也要指出，人类的大脑并不是我们想象中那样，是所有动物中最大的，一些猴类和鲸类的大脑比人类的大脑更大，因为它们庞大的身形决定了它们大脑的体积。同样的

道理，这个事实也说明了，大脑既不是感觉中枢，也不是情感根源，某些动物的大脑虽然比人类的大，但是它们的感觉和情感并不比人类更多。

当然，笔者承认，当大脑受到碰撞之后，感情活动就会中止，但这也说明，身体是通过对神经末梢的加力对大脑形成反应的，挤压神经末梢会使它变得麻木，这好比将重量加在手臂、腿部或身体其他部位之后，会使神经变得麻木一样。不过，通过挤压造成的感觉停止只是暂时性的，当大脑不再受到挤压时，感觉就会重新出现并恢复活动。笔者同时承认，刺激髓质、伤害大脑都会引起痉挛，导致知觉丧失，甚至会诱发死亡，这是因为神经完全被破坏了。

笔者可以再举一个例子，它同样能对大脑既不是感情中心也不是感觉中枢这个问题进行证明。让我们看看那些天生就没有头和大脑的动物，它们依然有感觉，能运动并生存。比如昆虫和蠕虫纲，它们的大脑不是独立系统，而且比较小，身体是由类似于骨髓和脊髓的物质构成的。因此，我们有理由把任何动物都具有的脊髓，看作感觉、情感中枢，而不是大脑，因为大脑不是所有有感觉的生物都具备的部分。

第三节 幸福：对长寿的体验

假如一匹马能够活到50岁，就说明它的寿命是其正常生命的两倍，这种情况并不常见。但是，自然界中的所有动物几乎都存在这种情况，因此和马一样，人类中也有一些人的寿命可以延长至其正常生命的两倍，即160岁，而不再是80岁。这些幸运者在大自然中是存在的，只是出现于现实世界中的概率在渐渐降低。

笔者曾经说过，我们曾活过就是活着的一个证据，通过表示生命可能性的计量表，我们能够对这一点加以证明，但这种计量表上所标示的寿命期往往要比人类的实际寿命长很多。当人的生命越完美，其生命越容易接近这种情况，甚至可以达到相当稳定的状态。如果我们敢打赌说一个80岁的人能够再活三年，那么，我们同样可以对83岁、88岁，甚至

90岁的人下相同的赌注。就算已是最高龄的人，我们仍然希望他能再活三年。这三年难道不能视为一次完整的生命吗？三年的时间难道不能让一位智者做出一个新计划？因此，只要我们的精神能永葆年轻状态，我们的心就不会衰老！所以，哲学家应该把关于人类衰老的言论当作不符合人类幸福的偏见。

这种想法并不会对动物产生什么影响。比如一匹10岁的小马，面对着一匹50岁还在劳作的老马，它不会觉得老马比自己更接近死亡。我们只不过是通过简单年龄的计算而得出不同的判断，但这个计算同时向我们证明，只要身体健康，哪怕是到了高龄，他们与死亡之间也存在一定的距离，但如果年轻人不加节制而滥用自己所处年龄段的精力，他们就会拉近与死亡的距离。相反，如果人们合理地消耗与自己年龄相符的精力，那么，可以肯定，到了80岁，依然还能再活三年。

如果清晨我能健康迅速地起床，那么在一天之中拥有的享受不就与你们完全相同吗？如果我能让自己的行为总是与聪明的天性保持一致，那么我不是同样聪明且比你们更快乐吗？因为健康的身体可以确保我多活三年甚至更长时间，这怎么会让我对自己没有把握呢？相反，那些曾经由于面对衰老而进行的遗憾回忆，却让我愉快地想起了以前种种珍贵画面和难忘时光，这些不都是与快乐有着相同的价值吗？这些画面是这般温柔和纯洁，给我们的内心带来太多的甜美感受。所有伴随着青春期的不安、忧愁和悲伤都在美好的回忆中消散，遗憾也因此而不复存在，因为它们已经化身代表着青春永驻的狂热与激情。

高龄幸福的另外一个优点也应该引起我们的关注，虽然处于高龄阶段的人们的身体已有所损伤，不如青春期时那么健康，但他们有了更多的精神收获，也就是说已经获得了精神上的一切，即便在体质上失去一部分，在精神上却得到了补偿。曾经有人向95岁高龄的哲学家封德奈尔请教，他一生中最遗憾的20年是哪段时间，他回答说，人生中令他感觉遗憾的事情非常少，反而是55岁到65岁的10年间是他最幸福的时光。封德奈尔的真诚回答是高龄幸福的最有力证明。人在55岁时，相对来说已经积累了一些财产，并获得相应声誉，赢得了尊重。这时候的生活稳定了，理想抱负或完成或取消，人生计划或成功或放弃，大部分的激情都归于平静或者衰退；通过工作也完成了自己对社会义务的履行；对手变

少了，或者更准确地说，具有威胁性的嫉妒者减少了，因为自己的功绩已受到大众的认可，一切精神收获都体现了年龄大带给人们的好处。只有身体的衰弱和疾病，才会打破这些他们通过才智创造出来的宁静享受和财富，也只有那些通过才智创造出来的财富才真正称得上是人们拥有的最大幸福。

悲观是一种违背人类幸福的情绪反应，对老年人而言，悲观的表现就是时时刻刻想着将要到来的死亡。这种想法让许多老年人感到痛苦，甚至对那些身体健康、还没有到高龄的老年人也会产生不利影响。笔者希望这样的人能够乐观起来，就算他们已经70岁了，距离理论的死亡年龄也还有六七年的寿命呢，甚至是已经80岁或者86岁的人，他们也可能还有好几年的寿命。因此，只有悲观且成天想着死亡就要靠近的脆弱的人，才会觉得自己的生命随时会终结。我们让心情变好、让精神强大的最佳方式，就是将自己欣赏的东西无限地扩大并与它们亲近；相反地，要远离所有令人不愉快的东西，并将它们的形象缩到最小，特别是那些会让人产生痛苦的念头，让事情顺其自然地发展是最好的方法。

生命继续存在，其实只是我们的感觉而已，没有谁能保证这种存在的感觉不会被睡眠所摧毁。当夜幕将临，感觉上的存在就会停止，这样我们就无法将生命视为连续不间断的感觉的存在。而且，生命也绝对不是一根连续的线，它是一根有着结头，或者说被死亡的断口分割的线，每个断口都在提醒我们那最后的一剪在向我们展示什么是生存的终止。既然如此，我们为何要在乎这根时时会中断的线的长短呢？我们为什么总是无法客观地看待生死呢？由于灵魂胆小的人要远远多于灵魂坚强的人，因此死亡的概念总是会被夸大，它的步伐才总是跟看起来一样急促，它向我们接近才会这样让人恐惧，它的面目才会那般让人憎恶。但是人们不会想到，每次对生存产生的不祥预感，对身体都是一次摧残，因为存在的终止本身并没有什么，而死亡阴影带给心灵的恐惧感却是巨大的伤害。斯多葛主义者认为“死亡被神仙所拒绝，但却是人类的至尊财富”，笔者对此并不认同，死亡既不是一大痛苦，也不是一大财富，笔者只是想努力弄清楚它的真面目。把这篇文章呈现给读者的最大目的，是希望能够帮助读者们找到幸福。

第四节 快乐和痛苦

快乐指的是让人感觉心情愉快的情愫，从生理上讲，让人感觉愉快的一定是符合自己天性的；反之，痛苦指的则是器官受到伤害。简言之就是，快乐指的是生理上的快感，而痛苦指的是生理上的不适。因此，我们相信，有感觉的生物，其快乐要多于痛苦。所有利于保留和维持人体组织存在和天性的事实都是快乐；而所有倾向于毁灭、伤害人体组织、改变天性的事实都是痛苦。因此，只有快乐可以让具有感觉的事物存续下去。如果令人觉得愉快的感觉的总和，也就是那些符合天性的事实，要比令人觉得痛苦的感觉或有悖天性的事实少，那些有感觉的事物就会因此失去愉快，然后因为过多的痛苦而死亡。

生理上的快乐和痛苦只不过是人类所有快乐和痛苦中很小的一部分。我们持续运作的想象力创造了一切，更确切地说是制造了大量不幸，因为想象力为灵魂提供的只是空幻的鼓励，甚至是夸张的景象，并强迫灵魂承受这些因景象带来的后果。灵魂在这些幻想的影响下，会逐渐失去判断能力，甚至会丧失自制力，开始变得喜欢幻想，而不愿意相信现实，且常常只对那些根本不可能存在的事情抱以信任。灵魂无法控制的意愿慢慢演化成一种负担，而过分地奢望又带来无尽的痛苦，只有心灵恢复平衡之后，才能重新具备判断能力，那些虚幻的想象才会消失。

因此，我们在寻找快乐的同时，要准备好承担痛苦，就好像我们希望自己变得更高兴时往往先承受悲伤一样。可以说幸福是始终根植于我们心中的，而悲伤只是我们自找的身外之物。因此，灵魂的安定才是人们真正的财富，只有安静的灵魂能够让我们获得快乐。当我们希望获得的快乐加倍时，也就会面临失去它的风险；而我们希望得到的越少，获得的往往越多。相反地，如果我们希望获得的东西超过了本性所能给予的，便会产生痛苦，因此只有本性赋予我们的才是真正的快乐。自然天性带给我们快乐，满足我们的需要，帮助我们抵抗痛苦的侵扰。而在生理上，快感远远超过了痛苦，所以，让我们感到害怕的并不是事实，而是幻想。换句话说，让我们担心的不是身体的痛苦、疾病和死亡，而是心灵深处的不安、烦恼和欲望。

动物获得快乐的唯一方式是不断填饱肚子，满足自己的食欲。人类尽管也有相同的特性，但我们还有另一种获得快乐的方法——通过精神去获得，即求知，而且通过这种方法得到的快乐是丰富而纯净的。如果我们的欲望与此截然不同，就会出现混乱，转移灵魂的注意力。当我们的欲望处于上风时，理智就会保持沉默，或者最多发出一些微弱的呐喊，此时我们对真理的厌恶就随之而生，幻觉的诱惑接踵而至，错误也越来越深，最终将我们引向痛苦的深渊。这时候由于我们无法看清事实的真相，只能凭借武断的感情或者欲望的指令去行动，就可能用不公平的态度对待他人，而自省的时候又被迫轻视自己，这就是最大的痛苦了吧。

在这样的幻想和愚昧的状态下，我们总是希望能够改变灵魂的本质。虽然我们固有的天性是为了认知，但此时的我们却用它来感觉。即便我们此时可以堕入这种蒙昧之中而不会失去什么，我们也心甘情愿地羡慕那些失去理智的人，因为我们的理智是断断续续的。而这种不连续的理智会造成我们的负担，甚至会变成一种责难，我们希望这种理智消失，因此我们总是处于幻觉之中，自愿竭力地丧失自我，尽量不再考虑自己，并最终将自己忘记。

如果欲望一直不间断，就会造成精神错乱，对于灵魂来说，这种状态就意味着死亡；间断性的强烈欲望，则是疯狂发作的迹象，神经病症的长期性和反复性让其显得更加危险。理性和明智是疾病发作时，偶尔出现的空隙，但它并不代表所谓的幸福，因为我们感觉到自己的精神出现了问题，就会对自己的欲望进行指责，对自己的行为满怀谴责。如果说疯狂是痛苦的最初表现形式，那么明知则是火上浇油。多数感觉痛苦的人都是有着非常强烈欲望的人，即俗称的疯子，他们有一些存在理智的间隙，当其理智占据上风时，他们就会意识到自己的疯狂，也因此深感痛苦。相比底层社会的人，上流社会的人有着更多不切实际的期望、抱负和过多的欲望、灵魂的恶习，因此，他们很有可能是幸福感更低的人。

让我们暂时放下那些让人觉得悲伤和羞耻的事情，去研究一下值得重视的那些智者。他们把自己视为自己的主人和各种事件的统治者。他们安于现状，乐于以当下的状态存在着，自给自足，几乎从不求助别

人，更不会成为别人的负担。他们不断发挥自己的精神力量，完善智力，培养情操，积累新的知识，而且时时刻刻都非常满足，不为任何事情悔恨和烦恼，享受自己的生活的同时也享有整个世界。这样的人毫无疑问是自然界中最幸福的人，他们把与动物类似的肉体快感和只属于自己的精神快乐融为一体，将两种幸福相结合。哪怕因为身体不适或者其他意外而遭受痛苦，他承受的这些痛苦也比别人少得多，因为精神力量会给他以支撑，理智则带给他安慰。甚至在遭受痛苦时，他也会有一种满足感，因为他的坚强足以应付这些痛苦。

第五章 论梦

布封认为，构成梦的内容的全部材料有些来自于体验，这是毋庸置疑的。不过，如果认为梦的内容和现实之间的联系非常清晰，那就是错误的，因为它们之间的联系只有认真观察才能发现。与此同时，布封还从人类与动物的梦的区别推测出人类的梦来源于心灵。他说：“人类清楚地观察到事物之间远隔的关系，所以我们心灵的这种能力是最辉煌、最活跃的才能，是高等智力，更是天才的表现，而这些是动物所不具备的能力。”

第一节 梦：模糊的回忆

在人的大脑中，存在着由于不同的原因而形成的两种记忆。第一种记忆是我们观念的痕迹，第二种记忆则是模糊的回忆，这种回忆的形成只是因为我们感觉的更新，准确地说是触发感觉的活动的更新。第一种记忆源自心灵，相比第二种记忆，对于我们而言更加完善；第二种记忆是由内心实际感觉的更新引发的，这种记忆是人类与其他动物共有的东西。这种记忆总是令我们现在的感觉和以前的相同，因此拥有这种记忆的人只是从总体上看待过去和现在，并不会加以区分，更不会比较，只知其然而不知其所以然。

对于笔者的上述观点，肯定会有人提出反对，还有一些人会将笔者的论述理解为其他动物也存在记忆，特别是举出狗会在沉睡中发出叫声这一例子。虽然狗发出的声音比较低沉，但还是可以从中分辨出猎捕的叫声、愤怒的叫声、欲望或者哀怨的叫声，等等。因此，这些人认为狗对发生过的事情是存有强烈而生动的回忆的。但狗的这种回忆与笔者刚刚所讲的记忆不同，因为这种回忆有可能随着外部环境的变化而发生变化。

为了对这个问题进行说明并找出令人满意的答案，我们需要对梦的本质进行考察，以便弄清楚梦究竟是来自心灵，还是仅仅依赖于我们实际的内心感受。假如我们能证明梦寓居于心灵之中，那么，这不只是对一个对不同意见做出的回答，更是对动物的记忆与理解力的一个新论证。

对于愚蠢的人而言，他们的心灵反应是比较被动的，虽然他们如常人一般也会做梦，但他们的梦与灵魂无关。因为在傻瓜身上，灵魂的作用实在不明显。动物没有灵魂，因此，我们也确信，它们所有的梦都与灵魂没有关系。我们可以对自己的梦做一番探究，这样就会清楚为什么梦境各个部分的联系是很松散的，梦中的事件是那样奇特。因为梦是围绕着感觉展开，而非围绕思绪。例如，在梦中的我们是没有时间观念的，在梦中会出现我们曾见过的人，甚至是那些已经过世很长时间的人，这些人在我们的梦中依然活着，就像过去一样。但是，我们在梦中会将他们与现在出现的人、发生的事情联系在一起，又或者是将他们与另一个时代的人或事联系起来，而且，我们不知道出现在梦中的地方是何处，我们脑海中出现的梦境，在现实中是并不存在的，但如果我们的灵魂可以自由活动，想来只需用很短的时间就能够从混乱的感觉中或是这种伤心的后果中理清头绪。只不过，它往往不作为，始终维持着混乱状态。我们的梦中出现的每个目标尽管都是生动的，但它们的形象经常模糊不清，并且总是一闪即逝。如果这些感觉的力量令心灵处于半睡半醒状态，就立刻会在空想中产生真正的意念或者沉思，但并不会强烈到可以将幻想清除的程度，而是混杂其中，变成其中的一部分。

我们从来对梦中发生的事进行比较，因此，我们在梦中只有感觉而没有概念，因为概念是对各种感觉进行比较得出的结论。如此，我们说梦只是存在于实际的内部感官中，而我们的灵魂并不产生梦，仅仅是人类回忆的组成部分，构成了那种实际模糊回忆的一部分。但是记忆却与此不同，它是在时间概念、先前概念和现实概念的比较中产生的，既然这些概念不会进入梦境，也就说明梦不可能是记忆，也不会是一个结果或者是事实，更不可能是回忆。不过，我们尽管坚持认为，自己经常做一些有思想的梦，并以梦游者为例来证明这个事实的存在，如梦游者在睡梦中会说话，并且可以回答一些问题，但当我们根据这个事例推导出

推理的意念，并把梦包含在其中时，就与笔者设想的同样绝对了。

第二节 梦和想象

有些人提出梦是有意识的，他们仍以梦游者，或在熟睡中也能有条不紊地讲述事情、回答问题的人为例，并据此推论出梦境中包含着意识。事实上，笔者也认为，感觉的更替可能会让人做梦，因为动物只会以这种方式产生梦，而形成这些梦完全不是以回忆为前提，它只是对事物的模糊记忆的反映。

不过，对于梦游者在睡梦中说话和回答问题是受到意识控制的行为这一说法，笔者还是无法相信。相反，笔者认为，在这些行为中精神并没有起到任何作用。因为梦游者会来回走动，还有其他的行为也没有经过思考，他们不会意识到自己的处境、由此产生的危险以及伴随他们行动的弊端，只是动物本能在产生作用——甚至不完全是动物本能在发挥作用。当梦游者处于这种状态时，他可能比一个笨蛋还要愚蠢，因为这种时候他只有情感和部分意识在发挥作用，而笨蛋却具有完全的意识，而且身体会有感觉。至于那些在睡觉中可以说话的人，他们不会说出什么新的内容，回答的只是一些简单问题，也只是一些简单的句子，这不能证明他的心理活动，这些活动都独立于意识和思维之外。既然在最清醒时，我们会做自我反省，特别是在欲望方面，我们会不假思考地说出许多事情，那为什么我们在睡眠中就不能下意识地说话呢？

梦的偶然性因素，是指先前的感受没有受到当前事物的刺激的情况下再次出现的原因。我们发现，人在深度睡眠中是没有梦的，因为此时一切外在的东西都出现在昏昏沉沉的状态中，不过，内心的感觉最迟入睡却苏醒得最早，因为与外在感觉相比，内在感觉更灵敏、更容易被惊醒，也更加活跃。幻想往往出现在尚未完全沉睡的时刻，最初的感受，特别是不用经过思考的感受会再次出现。由于外在感觉比较迟钝，内在感觉就会被此时的感受控制，从而反映和表现出以前的感受，感受越强烈，情景就越独特。这正好可以解释为什么大部分的梦要么令人恐惧，要么令人喜悦。

外在感觉甚至不一定是处于半睡眠状态，当它停止活动时，物质的内在感觉可以通过自身的运动产生反应。因此人们在休息前期，睡得并不沉稳，身体和四肢放松后都处于静止状态；眼睛闭上之后虽然变得蒙眬，但并未进入全暗的状态；在安宁的环境和黑夜的静寂中，耳朵也不再灵活；其他感觉都停止运行，整个身体处于休息状态，但还没有完全入睡。这种状态下，如果人们的头脑不再思考，内心不再活动，属于内在感觉的自制力就是唯一活动的能力。此时的人处于幻影叠加和阴影重重的状态中，我们醒来之后仍然能意识到睡眠产生的影响。身体健康的人们起床之后，脑海中会留下一幅清晰明朗的影像或者美丽的景物；而一些身体虚弱或有不适的人，他们的梦中出现的则是怪异的景象，甚至是恐怖的鬼怪形象。光怪陆离的幻影会在这时候充满我们的脑海，快速地变幻，梦中出现的事物越多、越来越强烈，就越令人不快，而且对其他感官的损害也很大，神经也变得越发脆弱，整个人会显得非常虚弱。

人在身体虚弱或者生病的状态下，由真实感受引起的震动要比在健康状态下更加强烈，而且让人更加不舒服，并且由这些震动而产生的感觉体现也一样更强烈，更令人不愉快。

我们对自己的梦有记忆是因为对刚刚的感觉不会忘记。人与动物的最大区别在于，人能够确定哪些属于梦，哪些属于意识，哪些又是真实的感觉，这是记忆在发挥作用，也是一种时间概念。而对于没有记忆和时间观念的动物而言，它们无法分辨梦和现实感觉之间的不同之处。因此，我们可以认为它们梦到的正是真正发生的事。

我们曾经说过，只有人类才具有思考能力，而动物是没有这项能力的。而理解力不仅是思考的一种能力，还要准确地运用思考，它们之间是因果关系。在理解力的活动中，我们只能区分出两种活动，第一种活动是比较我们获得的感受，并使之形成观点。第二种活动是比较观点，并使之形成推理。第一种活动是第二种活动的基础，一定是在第二种活动之前。通过第一种活动，我们能够获得特殊的观点，它能让我们认识所有敏感事物；通过第二种活动，我们能够获得一般观点，指引我们对抽象事物加以领会。由于动物没有理解力，因此也不具备这两种能力。但是大部分人的思考似乎只局限于第一种活动能力。

我们能够得出这个结论的原因在于，如果所有的人都能比较观点，并进行归纳，从而形成推理，那么他们就都能够创造出与众不同的、新颖而近乎完美的作品，以此展示自己的才能。如此一来，似乎所有人都具有创造的天赋，或者至少具有革新的能力，但事实并非如此，大多数人的活动只是缺乏创新精神的模仿，只能模仿已经存在的东西，思考模式和记忆程式也与别人的相同，这种行为，妨碍了他们思辨能力的发展，因而造成了他们无法独立进行创造。

想象力也属于一种内在能力，它可以让我们迅速抓住时机，挖掘出我们观察到的事物之间远隔的关系。因此，我们心灵中的这种能力是最卓越的才能，是高等智力，是天才的表现，而动物并不具备这种能力。此外，还存在着另外一种想象力，它与我们的身体器官密切相关，这是我们与动物共有的东西。它是一种类似于我们欲望的事物，是发生在我们内心的杂乱无章和不可避免的活动，这种想象力通过强烈的印象不停更新，让我们如同动物一般鲁莽地行动，它是我们产生幻觉的源泉，也是我们精神的敌人，而且操纵着我们的欲望。理智虽然发挥着一定的约束作用，但只要这种欲望占据了上风，我们就会陷入永无止境的悲惨境地。

第六章 人类的社会

人类不同于动物的最大特性在于人类具有社会性，这种社会性是由人们之间相互的交流、等级制度以及国家、民族观念的建立等因素构成。布封在对人类的本性进行描述时，也没有忽视人类的社会性，他首先从野蛮人的生活状况开始论述，然后通过一条清晰的线索讲述社会的形成过程。布封认为，人类社会形成的主要原因，是人类可以在社会中得到自己需要的东西。

第一节 野蛮人和社会

我们在前面对人类的繁衍、成长和发展，以及人类在人生各个年龄阶段的不同心态和感受进行了讲述，但是这些内容描述的都只是个体的历史，人类历史所要求的则是一些具体的细节，其主要事实需要从不同地带的各类人种中提取。这些细节主要体现在三个方面，首先是肤色。各类人种肤色不同，这也是不同人种间的显著区别。其次，各类人种在身体的形状和大小方面存在不同。最后，各民族有着不同的习性。毫不夸张地说，上述每一个细节都可以作为一个研究课题，也都可以写成一部鸿篇巨制，但由于条件有限，我们只能简单讲述一下最普遍、最确切的事实。

笔者认为，对于土著民族的风俗习惯，不应该做大肆地渲染。但所有论述这个话题的作者似乎都忽视了这一点，他们列举出的那些所谓事实，以及一些与社会因素相关的习俗常常只是关于个人的怪癖行为或者特殊行为而已。提出这些论点的作家甚至告诉我们，现在还存在着把敌人吃掉的民族；有些民族会把敌人活活烧死；还有些民族会残忍地肢解敌人的尸体；另外，还有些民族以挑起战争为乐，但也有些是喜欢和平生活的；甚至还有一些民族，会有父母吞食自己的孩子等。

其实，这些故事不过是旅游者在醉酒后津津乐道的一些特殊事例罢了。它只能说明，曾经有某个野蛮人吃掉了他的敌人，或者是某个野蛮人烧死或是肢解了敌人，又或者只是一个人杀死或吃掉了自己的孩子，等等。这些事情都有可能发生在一个或若干个未经开化的野蛮民族中，因为这些民族缺少规范，完全没有法律意识，甚至连领袖也没有。而且，从某种程度上讲，没有社会文明习俗的民族都不能称为民族，最多算是聚集在一起形成的一个杂乱群体或者说是一个野蛮的独立行动的团体。他们没有法律的概念，不受道德的约束，在他们的意识中，只服从于个体的欲望，他们之间由于没有共同利益，也不会朝着同一个目标前进。因此，这些特殊事例，是完全谈不上有着合理意图的习俗。

一个民族是由聚集在一起、相互认识的人构成的。他们使用同一种语言，有着一定的了解，有时会在必要时涂上同样的颜色听从同一个首领的指挥，共同武装或者通过相同的方式呼叫。如果这些习俗是固定不变的，他们就会毫无目的地聚集起来，而不会轻易分开；如果这些人的首领不是某个人或者某些人的心血来潮；如果他们拥有自己的语言，并且彼此之间可以简单地交流，这才是一个真正的民族。

事实上，由于野蛮人的头脑中只存在少量的观念，因此他们知道的也只是一些能应用于最普遍、最共同的事物的少量词语，这种情况带来的唯一好处是因为实用词语不多，所以人们能在很短的时间内听懂对方要表达的意图。这也是野蛮人为什么可以快速听懂并学会其他野蛮人的语言的原因，在这一点上，野蛮人与开化民族有些不同，因为一个开化的民族想要学习另一个开化民族的语言，是非常复杂且困难的事。

正因为没有大肆渲染所谓的野蛮民族风情的必要，所以才更需要仔细地对个体特征进行考察。其实，野蛮人是人们了解最少，也最难被描述的，而且是动物中最奇特的。因为对于我们而言，很难弄清楚大自然赋予我们的东西和我们通过教育得到的东西有什么区别，有时候甚至会把两者混在一起。因此，如果野人只是以展示他的真实色彩和天然面目来展现他的性格，那么，我们对他们不理解也就不奇怪了。

一个真正野蛮的野人，对于一个哲学家来说可能会成为稀有的物种，就如康纳提到的，那个在汉诺威森林中发现的被熊养大的男孩。哲

学家通过对这些野人的观察，发现了本性欲望的力量，而他看见的也是最真实、最原始的内心，以及区别于本能的各种动作。同时，他还会看到很多的温柔、平静和清心寡欲。

第二节 社会的形成

尽管笔者在目前还不愿意对感情和欲望的理论展开讨论，但仍然很高兴再次提起某些事实。这些事实足以证明，在自然状态下的人与大部分动物一样，时刻都在寻找肉食，因为他们不可能一直只靠青草、种子或是水果维持生存。

有一些哲学家提出，某些医生建议我们采用的“毕达哥拉斯食谱”并没有在大自然中得到过证实。但是，只有在黄金时代前期，一些天真无知的人才会喝生水、吃生食。由于食物充足，很容易得到，所以他可以心无波澜地独自生活，并且与其他动物和平共处。然而，当他为了与另外的人聚合而牺牲自由时，就代表着和平的黄金时代宣告结束，随之而来的是战争的铁器时代。这也是人类社会一直受到某些性情乖张、道貌岸然的哲学家指责的地方。这些哲学家为了维护个人的自尊，不惜对整个人类社会进行羞辱，他们还向世人展示出一幅只存在对比价值的图表，只因为这图表能够向人类反映出虚幻的幸福。

那种天真无邪、高度节欲、完全平和的理想状态是否曾经出现过呢？这难道不是一个将人当作动物而给我们教训和范例的寓言故事吗？我们是否可以认为在社会出现之前道德就存在了呢？我们可以发自内心地认可这种野蛮状态值得我们怀念吗？很显然，这些问题的答案都是肯定的。因为在幸福面前几乎没有人会去想不幸的事，是人类社会创造了各种罪恶，在原始状态中道德存在与否对他们而言又有什么关系呢？难道健康、自由和力量不比伴随奴役的柔弱、声色以及享乐更重要吗？当然，我们也可以说没有痛苦就是快乐，但为了得到幸福，是不是应该不再奢求呢？

不过，把话说回来，如果我们认为与认真生活相比，混日子会更快

乐；与满足食欲相比，没有食欲是一种幸福；与睁开眼睛认真观察相比，想睡就睡更简单，而且就这样做了，那么，我们等于是在麻痹自己的灵魂，禁锢自己的思想，也就等于将自己的灵魂和精神弃之如敝屣。若是这样，我们与动物也就没有什么区别了，最终成为其中一员，仅仅是和大地相连的一块原料罢了。

让我们用详细的论述取代没有意义的争执吧！在讲过道理之后，需要提出事实才具有说服力。我们肉眼所见的并不一定是理想状态，而是自然的现实状态。那些在沙漠中生活的人们是安静的动物吗？他们是否快乐？我们无法像哲学家那样，从主观上假设原始人与野人、野人与人类之间存在着巨大差别。因为笔者认为，如果思考事实需要制定一条费尽心力的法则，那么就不能进行这样的假设。如此，我们才能清晰地从最有教养、最文明的民族中看到落后民族的影子，再通过这些落后民族看到其他更不文明或者处于专制统治下的民族。通过那些落后的人看到另外不同的野蛮人，再去寻找其与开化民族之间的不同之处。其中某些民族形成了由首领统率下逐渐壮大的大型民族，还有一些则形成了规模较小、便于统治的小型社会，最后剩下的是那些既没有形成家庭，又没有形成体制的孤立或孤单的个体。

帝国、君主、家庭，是构成社会极权的因子，同样也是大自然的边界。如果它可以继续扩展，那么，当人们穿越地球上最荒僻的地方时，不就找不到那些被遗弃的子女，或是分散的父母、聋哑的人了吗？笔者认为，除非能够确定那时人们的身体结构与现代人的身体结构完全不相同，并且生长速度很快，否则，认为人类不用组成家庭也可以生存的观点就是不成立的。因为在孩子出生后的前几年中，如果没有成人的照料或帮助就会死去，而刚刚出生的动物却只需要被照顾很短时间就可存活。人类的这种生理状况就已经决定了人类只有在社会中才能延续和繁殖。父母与子女的组合形式是自然的，更是非常必要的。因此这种组合形式必然要求父母和子女之间形成持久的相互眷恋，这样就可以令他们能熟悉彼此的姿态、手势和声音。总之，这是表达所有感情和需要的方式，而且已经被事实所证明，因为与大部分人一样，哪怕是最孤单的野人也要使用简单的符号和话语进行交流。

事实上，那些生活在荒漠中的野人，也是有类似家庭的组织形式

的，父母和孩子之间互相熟识，使用相同的语言交流。在法国香槟省丛林中发现的女熊孩，以及在德国汉诺威森林中找到的男熊孩的情况，都可以对这一点进行证实。这两个孩子都来自人类社会，但年幼时，也就是他们刚能独立获取食物时，被遗弃在与世隔绝的环境中。当时，他们的大脑还没有发育成熟，不会有任何社会的概念，更不会使用手势和语言。但是，如果这两个孩子能够相遇，自然的天性同样能令他们结合在一起，他们会相互依恋，和平共处，因为他们不但会说表达爱慕的词语，还能学会与自己的孩子进行交流的语言。

让我们来观察一下在纯自然状态下组成家庭的野人。如果这个家庭比较兴旺，那么这个家庭里的男性就会是拥有众多人口的群体首领。在这个群体中，所有成员过着相同的生活，他们遵循相同的习俗，使用同一种语言。当这个家庭繁衍到第三代或第四代时，就会分裂出小家庭，但无论如何分裂，他们始终会被共同的语言和习俗约束在一起，逐渐发展成一个小部落。随着时间的推移和历史的发展与变化，一些小部落很可能会发展成为一个民族。这主要取决于野蛮人与开化民族之间的距离，如果他们生活的地方气候温和，土地丰饶，他们就可以将之变成大块的田园，并随意占据。在这里，他们只会遇到孤单的人，或者和他们相似的野蛮人，他们仍会继续野蛮地生存下去，但那些后面加入的人会因为各种不同的情况，成为他们敌人或朋友。可是，如果在气候恶劣、土地贫瘠的地方，因为人口过多造成空间的拥挤，产生相互压榨，需要向四周扩张土地，建立殖民地。于是，他们就会与其他民族发生冲突，甚至引发战争，战争中的失败者就会成为获胜者的奴隶。因此，人类在不同的状态下，都有形成社会的趋势，受到气候条件的影响并不大。这是一个必然出现的不变结果，因为繁衍原本就是人类的天性。

这就是社会！是以大自然为基础建立起来的社会。接下来，我们再来研究一下野人的饮食习惯。我们发现，仅仅靠水果、青草等食物，野人是无法维持生命的，相比这些食物，鱼肉似乎更受到他们的欢迎。同样，野人也不喜欢喝纯水，他们通过制造或是想其他办法获得一些更有滋味的水。法国南部的原始人饮用棕榈树中的水，北部的原始人喝的则是鲸油，还有一些原始人掌握了发酵技术并由此得到口感更好的饮料。在自然食欲的驱使下，他们制造出打猎和捕鱼的工具，如弓箭、渔网、

渔船等，这些工具是他们为了满足口腹之欲制造出来的东西，也是出自他们卓越的思考。适合他们口味的也就表示能够满足他们的天性，因为人不能只靠吃草而生存，如果不食用富含营养的食物，肌体就会营养不良。由于人类只有一个胃和一段不长的肠子，因此不能跟那些拥有四个胃和超长肠子的动物一样，可以一次食用很多的素食，例如牛，它们是以食用食物的数量弥补质量不足。同时，对于人类而言，只有同样的水果和种子也是远远不够的，还需要大量的富含营养的有机物。就是到了现在，尽管面包是用小麦中最纯的部分制成，而且小麦与其他种子、水果都经过了改良，营养价值要高出那些野生果实，但如果仅仅以面包和水果为食，人的身体还是会变得非常虚弱。

我们可以去看看那些出于神圣目的而过着素食生活的苦行僧，他们拒绝造物主的恩赐，放弃交流的机会，远离社会和人群，自我封闭在与大自然隔绝的殿堂中，禁锢在如同活死人墓般的避难所里，只有呼吸还能证明他们依然活着，在饱受折磨的脸上那双灰暗的眼睛，投向四周的只是无精打采的目光。他们看上去命若悬丝，他们吃东西的唯一目的是满足身体的需要。因此，尽管有虔诚的信仰作支撑，他们的生命也总是很短暂，只是，于他们而言，死亡并不意味着生命的终结，而仅仅是完成了生命的一个过程而已。

第七章 人的优越性

布封把人类的出现看作是生产斗争的结果。他认为，相比其他动物，人更具优越性和高级的原因在于，人类具有智慧和力量，这是其他动物不可能具备的。布封的文章中虽然偶尔也会出现“造物主”一词，但他仍然强调，上帝早已在人类发展史中失去了至高无上的地位，人的力量才是最伟大的。布封曾经因为对人类的维护而触犯神学的利益，差点遭受宗教的审判。这充分说明，布封的理念和观点打破了他所处时代的限制，这也正是他的先进之处。

第一节 人类与动物的比较

人类通过思维信号来传递内心的所有活动，而思维信号就是语言，因此也可以认为，人类是以语言来表达自己的思想的。任何人种都拥有思维信号，即使是生活在蛮荒地带的野人也有自己的语言，他们之间同样以语言进行交流，通过对话让对方明白自己的意图。不过，其他任何的动物却不具备这种思维信号，哪怕是与人类非常相似的猴子也没有这种功能。这并不是因为猴子的器官缺少这样的功能，在对猴子进行解剖之后发现，它的器官跟人的器官一样完善，因此，猴子不能产生语言的关键还是在于它没有思维。假如能赋予猴子思维的能力，它就能够开口说话，或者是当它们的思维与人类的思维能相通时，两者之间就可以进行交流。现在，我们假设猴子是有自己的思维的，那么猴子之间可以用它们的语言进行交流，但我们从未发现它们会相互交谈或者讨论。这是因为它们缺乏一种连贯的、秩序性的思维能力，它们没有灵魂这种东西，所以就不能通过语言来表达思维，甚至连最低层次的思维方式也不具备。

动物不能说话的原因确实不是器官的不完善，自然界中有许多动物，只要我们愿意花费时间和精力教它们，它们就可以开口说话。如果

我们还能为此下大力气，经过较长时间的训练，它们甚至可以说一些长句子，但无论我们付出多少努力，也不能让它们理解这些字音代表的意思。它们只会不断地重复这些简单的语句，就如一种回声一样。我们由此推断，动物缺乏的不是产生语言的器官，而是思想。因此，笔者认为，语言的形成是建立在连贯的思想之上，而动物不具备这种思想的连贯性，也就无法形成任何语言。思想的连贯性是构成思维的本质，动物尽管不具备这种能力，但我们却必须承认，它们与人类最初的状态和最机械的感觉非常相似。由于动物无法思考，不能说话，因此难以将它们的思想连贯起来，正因为如此，它们也不可能发明什么东西。如果动物能拥有最基本的思维能力，它们就能掌握更多的技巧，获取更多的成果。比如，如果河狸具备思维能力，那么，它就会以更高超的技巧去建造出一个比以前的巢穴更加完美的巢穴；如果蜜蜂具备思维能力，那么，它就可以完善自己的蜂房。这些例子都对笔者的观点提供了有力的支持。

可能会有人提出问题：既然动物们的作品都表现出统一的形式，那么这种形式的蓝本源自哪里呢？是否有另外一些更具说服力的证据说明它们的活动只不过是机械的、纯粹的、实际的结果呢？关于这些问题，笔者的答案很简单：某种动物的单一个体的做法或许会有些不同，但这并不代表所有的动物都是按统一模式进行工作。之所以这样说，是因为动物行为的顺序是整个属类所共有的，并不只属于单一个体。而且，我们如果想要赋予动物思维能力，那么就必须在每个种类的动物身上付出相同的努力，让所有的个体都同样参与，因此这个思维与我们的思维必然有着巨大的区别。

上述内容又引发了几个问题：我们的作品和成果为什么与他人的存在着差别？对于我们而言，为什么创新比一种新的模仿更有价值？这是由于我们的思维是属于自己的，而且独一无二，与另外一个人完全不同，因此我们才与他人没有任何共同之处。事实上，当我们只余最落后的能力时，我们才会与动物相似。

自然界中就算是那些最完美的动物，其能力与我们也有着一段非常遥远的距离，因为人类拥有不同的天性和思维，这就是人类与其他动物的本质区别，人类只有经过一片无边的空间才可能进入动物的范围。因

为，如果人类属于动物目，那么在自然界中，将会存在着某种可能不如人类那样完善，但要比其他动物更完善一些的生物，我们借助这种生物从猿逐渐过渡到了人。但是，这并不表示我们是突然从想象的生灵过渡到实际的生灵，从精神力量过渡到机械力量，从有目的、有秩序的活动过渡到盲目无措地活动，从沉思过渡到生存需要。

我们正是通过这些特征体现了人类卓越的能力，展示了大自然在人类与其他动物之间设置的区大差别。人是一种有理性的生灵，而其他动物则是没有理性的生灵。在有理性生物和无理性生物之间不存在中间过渡生物；在肯定和否定之间也没有第三种选择。很明显，在天性方面，人和动物是截然不同的，两者之间只是具有相似的外部，如果根据这种表面的特征对人和动物的差别进行判断，那就是任由自己被表面现象欺骗而得出错误结论。

第二节 人力改造自然

地球上的所有生灵都是幸运的。首先，大自然不仅以其雄伟胸怀为生灵提供了生活的场所，还为生灵们提供了发明创造的原料。一道从东方一直延续到西方的纯净光芒，为这个美丽的星球接连不断地镀上一层金色，这束清盈、透明的光线滋润了万物，释放出来的柔和的光和热使万物生机勃勃，令各种生命得以绽放；其次，大自然为生灵的生长提供了大量纯净而鲜活的水；再次，大自然塑造出来的陆地，其上突起的丘陵挡住天空中的雾霭，让地面的空气保持清新，凹陷的洼地是天然泉涌的聚集地；最后，大自然还会为生灵在地球上划分出海洋，这些海洋与陆地一样，幅员辽阔。但是巨大的海洋自身并不活跃，大自然划定了它们的边界，它们只是随着天体的运行而做有规律的涨落，与月亮同升降，并在太阳和月亮一起升落时涨落的幅度很大。

大自然为生灵们建造了以上神奇雄伟的外部宝塔，同时也在宝塔内部创造出更为奇妙的东西，所以大自然的伟大注定被我们崇拜。在它的指挥下，万物丛生；它在生物之间设立了有序的隶属与和谐的关系；它指挥人类美化大自然，耕种土地，修剪荆棘，大量种植葡萄和玫瑰，让

生灵们能够更好地生存。

然而，生灵们不应该盲目地崇拜大自然，尤其是人类，因为人类的力量会对大自然产生影响。让我们来看一看那些没有经过改造的大自然：这是一片荒凉之地，以前从来无人居住，有的只是遮天蔽日的繁茂大树，其中一些树没有树皮或者树冠，它们或弯曲或倾斜，仿佛要倒下来一样，另有一些树已经腐烂，这种腐烂的树木掩盖住了刚刚长出来的树芽。大自然在其他地方闪烁着自己的青春活力，但在这里显露的却是老朽的状态。大地承受着残存废料的侵扰，随处可见布满了寄生植物的老树枝；所有的低洼地区都是一潭死水，由于缺乏疏导而变得浑浊，而且散发出恶臭，同时，还有很多淤泥地带，无论陆地生物还是水上动物都不敢接近；那些生长在这里的恶臭植物，滋养着许多害虫，根本就是肮脏生物的乐园。腐臭的沼泽地和衰朽的树木之间是一片延伸的荒野，但它与大草原完全不同，在这里生长的草都是有害的，它们不是柔软的细草，而是带刺的、坚硬的草，它们相互缠绕在一起，厚度达好几尺，一茬接一茬地野蛮生长，将良草压窒而亡。在这片蛮荒的地方，既没有道路，更没有智慧的痕迹，如果人们想要穿越这片地区，就只能沿着野兽出没的小路前进，并时刻保持高度警惕，提防这些凶残的野兽，以免成为它们的猎物。

人们害怕这些野兽的嚎叫，也惧怕凄凉的静谧，于是掉头返回，并在心里鼓励自己：“荒凉的大自然是如此死寂，为了让它富有生机，一定要想办法疏通这些沼泽，让它们形成小溪和沟渠。不过，我们只能依靠烧荒或是利用铁器等简单的工具来改造这片荒地。也许不用太久，我们就可以让这里的灯芯草或者形成蟾蜍毒液的荷叶消失，取而代之的是三叶草等甘美多汁、有益于健康的牧草，成群的牲畜在这片草地上生活。这里有充足的水源，茂郁葱茏的草地，牲畜群会越来越多。让我们利用这些助手开始工作吧，让牛套上轭下田耕地，让土地因耕种而变得肥沃，我相信，充满活力的新的大自然会在短期内出现。”

通过人力改造大自然是一项伟大而有重要意义的工程，由于人的劳作，它开始变得绚烂多彩，它是人类高超工艺的体现，人类以自己的能力和技巧使大自然重现美丽姿态。大自然中隐藏的那些不为人知的大量宝藏和财富，逐渐被挖掘出来。在人们的努力下，花卉、果实、种子的

种类也日益增多；那些对人类有益的动物被不断推广，数目越来越多；而对人类有害的物种正在被慢慢抑制或者消灭；金矿和铁矿不断被人们从大地腹中挖掘出来；激流被控制，江河经过疏导，奔腾在整个地球上；阻断两个半球的海洋也被征服；土地被耕种之后变得肥沃而丰饶；在山谷、平原、草场和田地中，到处生长着各种果树；曾经光秃的山地已被有益的树木覆盖；荒凉的沙漠变成适合人居住的城市，人们之间的往来变得更为频繁和便利；无数的道路被开辟，人来人往，无比热闹。这些都是人类社会力量与团结的象征，还有另外一些体现人类威力和荣誉的成绩，都共同证明了主宰大地的人类，能够赋予大自然更新的面貌。但是，这些东西也能从反面证明，人类在对大自然改造的同时，几乎一直在与造物主进行抗争。

但人类之所以能够主宰大地，只是因为他的征服。他享受着因改造而带来的成果，不过却不能一直无所顾忌地占有，只有不懈地努力才能保存这些成果。一旦停止努力，一切就都会重新萎靡，一切都会变质，甚至一切都会快速重回造物主手中；如果停止努力，造物主就会发挥威力，收回属于自己的权力，将人类做出的成绩一扫而空，让人类建造的最辉煌的建筑上布满尘埃，再慢慢将之摧毁，只留给人们一个惨痛的回忆，这时的人们唯一能做的就只有悔恨——悔恨因为自己的过失而葬送了祖先创造出来的辉煌成果。这种人类失去主宰权的时代就是摧毁人类生活的蛮荒时代，最直接的表现就是饥荒和死亡。

人类只有团结起来才会产生巨大的力量，只有在和平时代才能拥有真正的幸福。然而人类往往具有一种疯狂的无理性，总是喜欢将自己武装起来造成自己的不幸，总是利用自己制造的战争使自己快速衰落。他们被贪婪激发，被野心蒙蔽，从而主动放弃理智，通过各种力量自己对付自己，想尽一切办法进行相互摧毁，其结果就是把自己推向灭亡的道路。只有等到血腥的战争结束，等到所谓的“荣光”消弭于无形，他们才怅然发现，大地在他们的折腾之下已经破败不堪；文明已经尽丧；人们精疲力竭，流离失所；人类自身的幸福已无从谈及，不复存在；人类的力量再次消失。

自然的世代

在人们的通常认知中，大自然永远保持着原来的状态，既不变质也不变形。事实上，大自然的发展进程并非绝对固定。布封在对地球的发展历史进行论述时，把地球的历史划分成七个时期，他认为，地球在第三个时期已经冷却到足以形成最初的生命，但是相比我们今天看到的生命形态，此时形成的生命形态有着很大的不同，它们是能够适应更高温度的物种，是地球不断降低的温度导致了它们逐渐灭绝。由此也说明，今天的大自然与大自然的原始形态是大不相同的，它与后来在时间的嬗变中表现出来的差异也是极大的。这种大自然在不同时期的变迁，我们称之为“自然的世代”，本篇内容节选自布封《自然的世代》一书。

第一章 地球及其组成

布封在解释地球的形成时，坚持的是唯物主义的观点。他指出，地球和太阳之间有着许多的相似之处。例如，他认为地球是冷却之后的小太阳；认为大海和沙漠是由地球上最初产生的物质演化而成，然后才出现了植物和动物，最后人类得以孕育。在布封的论述中，地球的进化并不是如同《圣经·创世记》中所言，是按上帝的意愿创造出的，而是在漫长的岁月中逐渐演变而成。为此，布封认真研究了大地、山脉、河流、海洋等，努力寻找大自然变迁留下的证据，为现代地质学的发展奠定了基础。

第一节 自然的分类

如果把一个失去所有记忆或是对周遭事物还残存一点意识的人放到自然中，那么自然界的所有对他来说无疑都是新奇的。一开始，他对一切事物都没有分辨力，但如果我们反复让他观察同一个事物，加深感受，很快他就会对生命的物质产生相对总体的概念，也能分辨出自己与其他生命物质的区别，并可以区分有生命物质和其他无生命物质的不同。进而，他的脑海中会对不同物质逐渐形成三个大的分类：动物、植物和矿物。同时，他也会对土地、空气、水三种截然不同的事物，产生一种清晰的概念。在他的脑海中，会产生对生活在陆地、海洋和空中的生物比较特殊的概念。这些概念促使他做出第二次分类：四足兽、鸟类、鱼类。对于植物界，他同样可以发现树木与其他植物的不同，并逐渐形成清晰的划分概念，按三种方式对植物进行分类：一是植物的高度；二是植物的材料；三是植物的外形。这种划分方式是建立在他对植物简单观察的基础上，而这也是我们在对自然界中的事物进行划分时需要遵循的原则。

我们想象一下，如果他能获得更多的知识，一定会以与之前不一样

的角度去观察整个自然界。比如，在对自然界中的兽类进行研究时，他首先会将自己认为最重要或者最感兴趣的物种排在前面，如果他对兽类中的牛、马、狗偏爱，就会把注意力都放在观察这些动物上；而对于那些他不喜欢或者不熟悉的物种，则不加理会，毫不关心；对于那些生活在特殊气候条件下的兽类，如大象、羊驼等，只有在他取得了相关知识之后，在好奇心的驱使下才会进一步做研究。同样的道理，对于自然界中的其他物种，如鱼类、鸟类、虫类、贝壳类、植物、矿物等，他也会选择自己熟悉而且感兴趣和必要的事物进行研究，并在脑海中用自己拥有的知识对它们进行类型的划分。

以上所讲的这些分类方法是所有分类中最基础和规范的，也是我们确信需要遵循的划分原则。我们一开始对事物的分类方法与上面所举的例子相同，我们会根据这些事物和我们之间的关系以及我们对它们的熟悉程度，一步步地选择不同的研究对象。其实，这是最简单的观察事物的方法，比其他复杂、精细的方法更有效。因为在所有的方法中，唯有这个方法能让我们随心所欲。总之，这个方法更适合研究与我们相关的事物。

第二节 地球

在广袤的地球表面，我们可以看见高山、幽谷、平原、海洋、沼泽、江河、洞穴、火山等看起来似乎没有任何规律和秩序的事物。而在地球内部，好像也存在着偶然的、不规则的物质，如金属、矿物、砂石、沥青、泥土和水等。

但当我们对喷发之后的火山仔细观察后，就会发现一些隐藏着的、我们从来没有见过的景象：布满裂痕的岩石、新出现的岛屿、被火山灰掩盖的平地、塞满了火山灰的岩洞等，从这些景象中，我们意识到地球上产生的所有景象之间都存在关联性。地球初期，比重较大的物质会压在比重较轻的物质上面，坚硬的物质会被柔软的物质包围，干的、湿的、冷的、热的、易碎的物质全都混合在一起，处于一种混乱的状态中。

这些景象好似无数垃圾堆积起来形成的废墟世界，但我们仍然安全地生活在这片废墟之上，人类、兽类、植物一代又一代地生活在这里，生生不息。地球上的一切物种也在以一定的次序不断循环，大地为人类提供着固定而丰富的生活资料；海洋有其固定的范围和运动规律；大气正常流动；季节按其固定的规律交替……安静和谐是这里的主要特征，到处都充满了生机，这些景象让我们震撼，不得不为造物主的智慧和力量叹服。

第三节 海洋与沙漠

海洋

如果我们站在高处向地球眺望，会发现，首先呈现在我们眼前的，是覆盖着地球大部分面积的水。这些水总在地球的低洼处，保持水平，似乎永远处于平衡和静止的状态。可是现在，我们却发现它们正在以一股强大的力量波动着，这股力量的存在打破了原有的平衡，迫使海洋进行周期性的均衡运动，即海面的交替涨落，巨大的浪涛翻腾。

接下来，我们将注意力转向海底，与地表的高低不平一样，海底也不是平坦的，不仅存在着山峰和低谷，还有深谷、沟壑和各种岩石。如果我们认为海面突起的岛屿是大海的“山峰”，那么这座山峰的脚下全部是水，不过，也有一些山峰的高度与海平面几乎持平。我们还发现，海洋中似乎存在着一种与普通运动不同的激流，这些激流时而向着相同的方向运动，时而向着不同的方向运动，但仿佛有一种力量始终约束着它们，使它们无法超过某个界限，这种约束力量如同限制地表的江河的力量一样，是永恒不变的。出现激流的地方通常是风暴地带，狂风加速了暴风雨的侵袭，海洋和天空都变得浑浊起来；风暴引发了海底内部的运动，导致火山不再沉睡，开始从海底迸发出火热的气浪，这股气浪与水、硫黄、沥青混合在一起冲向天空。

离开“大山”我们再来看看表面始终平静但其实处处都充满了危险的海底世界。在这里，风暴依然发挥着它的威力，我们即便是拥有出色的

驾驶技术，在这个时候也变得毫无作用，我们的船要么赶紧停下来，要么沉没海底。

最后，我们再对地球的极地进行一番观察，我们会看见巨大的冰块脱离冰山，如同漂浮在海洋上的山峰一样，在移动过程中慢慢消融，一直漂浮到气候温和的地方才彻底融化成水。

以上就是庞大的海洋帝国呈现给我们的景象，这里生活着成千上万不同种族的居民，有的裹着贝壳，轻盈地穿梭于水中；有的背着厚厚的甲壳，缓慢地爬行在沙土里；有的则依靠大自然赋予它们的翅形的鳍来行走；还有一些只是在海底游来游去，没有任何的活动方式，依附在各种岩石上生活，这些在大自然生存的各种生物在这片水域中都能够找到自己喜欢的食物。海边，生长着各种茂盛的植物或苔藓，还有一些奇特的草木；海底，是由泥土、沙子、砾石构成，但最多的还是泥土，有一些海底也由硬土、贝壳或岩石等组成，这一切都与我们生活的陆地很相似。

沙漠

现在，我们来讲述一个没有繁茂树木和充足水源的地方。在这里，头顶上是灼热的太阳和永远干燥的天空，脚下则是满布沙砾的荒原和光秃秃的山脉；在这里，放眼望去，出现在我们视野里的都是迷离的黄沙，难以见到鲜活的生灵；在这片死气沉沉的土地上，能够看到的只有骨骼、石头以及或矗立或歪斜的岩石；在这个一望无垠的沙漠中，穿越此处的旅行者呼吸不到阴凉的空气，也没有什么可以为伴，更没有什么东西能够使他联想到活跃的大自然，这里只有无边无际的孤寂。这种孤寂远比森林的沉寂更加可怕，因为对于一个形单影只的人而言，森林中还有树木这样的生灵，而这里却是实实在在的空空如也，处在这样的环境，人只会觉得更疲乏、更迷茫、更无助，这里的任何地方都有可能成为他的坟墓。

在这里，与黑夜的寂静相比，白昼的光线更加凄凉，这些光线似乎只是为了让旅行者看清沙漠的光秃和贫瘠；只是为了将荒漠之地的空旷显示得更加清晰；只是为了让旅行者对自己的恐怖处境更加清楚，让他

了解身处之地与居住地之间的阻隔是如此之大。任何一个经过这个地方的旅行者想来都不愿意待在这里，因为饥饿、干渴、酷热充斥的这个地方随时都会让人的生命陷入绝境。

第二章 自然的各个世代

地球的演化走过了一段非常漫长的历程，在对自然史进行研究时，我们需要挖掘地球的发展历史，既要通过寻找地下古老的遗迹，收集断断续续的片段，也需要把象征着文明变迁的资料以及能够帮助我们追溯大自然各个世纪的文物集中在一起，构成一系列的证据，这样我们才能清楚大自然的历史，才能在广袤的空间中找到确定的点，然后在漫长的时间旅程上建立里程碑。这是研究自然史的唯一方法。

第一节 宇宙的发展

我们在对过去的历史进行追溯时，最大的阻碍是时间的流逝和空间的距离，如果没有编年史纪事在过去黑暗的时间里点燃的火炬，那么，我们将如同身处无边无际的荒野之中，看不见终点。这些编年史尽管为我们指引了前进的方向，但当我们去追溯几世纪以前的历史，仍然会遇到许多的问题，在对失误的原因进行判断时犯下许多的错误。如果我们继续追溯的历史更加久远，那么其内容只会更加黑暗。

而且，在人类有记载的历史中，也只是包含了少数几个民族的活动状况，更准确地说，只是整个人类社会的一小部分行为而已；对于那些没有被记录的人们，我们的了解几乎为零。对于我们而言，他们就像空中楼阁一样突然出现，又如同幻影般毫无预警地消失，不留痕迹。但愿那些只是依靠罪恶或者以血腥的光荣而被人们称颂为“英雄”的人物，也能像那些默默无闻一去无踪的人们一样，被永远淹没在历史的洪流中。

上述情况之所以出现，是因为我们对人文史的界定有着双重限制：第一，体现在时间上，因为距离我们生存的时代的不远之处就是一片虚幻；第二，体现在空间上，因为它只能扩散至非常小的区域。但是，在对自然史的界定上却与此不同，尽管它也包括了一切的时间和空间，但

除了受到宇宙的限制外，并不会受到其他的任何限制。

既然大自然是与物质、时间和空间相伴的，那么关于大自然的历史也就是关乎一切存在、时期和地点的历史。蓦然看去，我们会感觉大自然是如此伟大，它不仅不会变质，更不会变形，哪怕是在大自然生成的那些最脆弱、最容易消逝的物种中，我们似乎依然能够看到它们一如既往地保持着原有的状态，因为它每时每刻都是最初的样子，在我们面前反复再现。然而，只要我们仔细辨别，就会发现，大自然的进程并非固定不变，它已经呈现出显著的变形，也会接受一些总是处于变化的物质，它甚至还会以一种新的化合物或某些实体的变更为模型发生变化。总之，从整体上来讲，大自然的表面是固定的；但从组成部分来讲，大自然确定不断在发生变化。因此我们有理由相信，今天的大自然与大自然的原始形态是大不相同的，它与后来在时间的嬗变中表现出来的差异也是极大的。

这种大自然在不同时期的变迁，我们称之为“自然的世代”。大自然经历过各种不同的类型，大地的表面曾表现出各种不同的形态，甚至是天空也曾发生过变动。宇宙中的所有物体，包括精神界的一切事物都处于持续变化、绵延不绝的运动之中。大自然之所以是现在这种状态，有两方面的原因，其一，是大自然自己的功劳，其二，是人类的贡献。因为我们已经学会如何驾驭它、节制它和改变它，从而使它可以符合我们的要求，满足我们的欲望。我们曾经对大地进行探索、耕耘和扩展，因此今天大地的面目与它在各种技艺发明前的面目，肯定有着巨大的区别。存在于寓言中的黄金时代恰当地说，只是科学和真理的黑暗时代。生活在那个时代的人们还处于半野蛮状态，他们为数不多，分散生活，还没有将自己的潜力完全挖掘出来，也尚未意识到自己的真正能力，他们的智慧还没有得到全面的开化，不清楚团结的力量有多大，更不会想到利用群体力量进行协同劳动，让宇宙间的万物为自己所用，发挥它们应有的作用。

因此，我们必须去那些刚刚被发现的地区，去那些从来没有人居住过的地带，寻找和研究自然，这样才能获得关于大自然本来面目的一些概念。但是，如果我们把这种“往昔”与五大洲还被水覆盖的时代进行比较，与鱼类还生活在平原上的时代进行比较，与高山还只是大海中一块

礁石的时代进行比较，它充其量只能算是很近代的事情。从没有文字记载的远古时代开始，直到有文字记载的现代，这个时期内曾经出现过多少变迁，又有过多少种不同的情况啊！我们不知道这段时期有多少事情被掩埋，也不知道有多少变迁还没被发现或是被我们完全遗忘，更不知道在人类出现并拥有记忆之前发生了多少激变。人类在经过了长时间的持续观察，经过将近三十个世纪的培养，也只是慢慢认识大自然的现状，至于整个地球的面目，我们依然没有完全认识。连地形的确定也是发生在不久之前，而对地球内部的了解依然停留在理论的层面。我们现在的目标是分清地球构成元素的次序和分布，也是在当代，人们才开始将如今的大自然与原始的大自然进行对比，才依照它已知的现实状况去追溯它过去几个世纪的状况。

然而，由于我们要穿越时间的黑洞；要利用对当前事物的了解，去推测过去事物的存在状态；要仅仅凭借现存事实的力量，去推测被淹没的事实真理，因此，我们需要集中所有的力量，借助于三个依据——能使我们了解大自然起源的一切知识，在大自然原始时期就存在的一切运动，以及与大自然的后续各期概念相关的一切传统，然后我们再努力利用类推法将它们连在一起，形成一个系统。如此，我们对自然才能有一个全面清晰的认识。

第二节 洪荒时代

为了让我们对洪荒时代的陈述不迷失方向且更加清晰明确，我们必须从比较早的世纪说起。在那个世纪，水一开始是被高温蒸发成水蒸气在空中漂浮，再慢慢凝聚起来，之后落到炽热、萎缩、干燥、龟裂的大地。当大地开始凝固时，也就是在它初步冷却的过程中，那些具有挥发性的物质都被分解、化合、升华，甚至迅速地陨落。我们可以想象一下，那种陨落的景象是多么奇特，多么骇人！空气的元素和水的元素逐渐分离，风暴和浪涛激荡在一起，并以漩涡的形态倾泻到还冒着缕缕青烟的地面；空气中的最初起着阻挡光线作用的大气层，后来被慢慢净化；但这些被净化的大气层，现在重新被浓烟般的云雾遮盖而变得黯淡起来；洪水落下又涨起，持续沸腾，反复地被蒸馏；空气中那些已被升

华的、具有挥发性的物质，现在也都从空气中分离出来，或急速或缓慢地陨落，一阵冷一阵热地对周围的空气造成侵袭。

我们可以想象到，那时的洪水几乎覆盖了整个地面，它们因为自身不停地涨落而发生搅动，由于受到月球对空气中气层和地上洪流的吸力而翻动，在狂风侵扰等强烈外力的影响下纷纷流窜，并在流窜的过程中冲击地面上的沟谷，使其变得更深；还会冲塌那些不够坚实的高地、不够坚固的山峰，摧毁绵延山脉最脆弱的部分。在洪水慢慢稳定后，沉积到地下，然后在地底冲出伏流的道路。它不断地侵蚀着地下洞穴，使之崩塌；它不停涌入新形成的深渊，使大地表面的洪水水位逐渐降低。这些地下洞穴原本是地火燃烧留下的杰作，现在却被洪水冲击，直至冲垮、摧毁。因此，通过这个结果，我们相信地下洞穴的坍塌就是洪水降落的直接原因，而事实证明，这也是洪水降落的唯一原因。

第三节 最古老的物种

我们能够确定，现在我们在海拔很高的地方发现的贝壳或者其他海产品，都属于大自然中最古老的物种。将这种出现在较高地区的海产品和那些出现在较低地区的海产品进行对比，对于考察自然史有着非常重要的作用。我们相信，在构成丘陵的贝壳中，有一部分属于未知种类，也就是说，在任何人能够到达的海洋中都不存在类似的活贝壳。如果有一天，我们能够把海拔最高处的贝壳收集起来，整理成一个种类系列，或许可以判断出哪些贝壳是古老类型，哪些贝壳是现代类型。已经发现的无数活化石证明，某些陆地生物、海洋生物在遥远的古代确实曾经存在过，但现在我们没有在地球上发现相似的物种。同时，这些化石还证明，这些古老物种比现存的、同属的任何一种都大得多：那些尖锐粗犷的大臼牙化石，每个的重量都有五六千克；拥有这种巨大牙齿的生物，以及在岩石中留下印记的鹦鹉螺，它们的身躯长达二三米，高约0.3米。这些物种肯定是兽类或贝壳类中的庞然大物，它们生活的时代，大自然正值壮年，能以充沛的精力在高温中制造有机物质。这些有机物质比较分散，难以与其他物质相融合，但它们能够自行聚集，自由组合，从而构成庞大的体积，形成巨大的躯体。这也是为什么宇宙初期，地球上存

在这么多庞大物种的原因。

大自然一方面形成海洋，另一方面又在那些海水不曾侵蚀或是海水已经退去的陆地上散播生命。这些陆地与海洋有着相似的特征，只能够培育出可以酷热的生物，因为那个时候的地表温度要比现在适宜生物生存的温度高。我们现在发现的一些古生物遗迹，都来自于地下，尤其是从煤矿或者青石矿的矿坑中发掘出来，这些遗迹向我们表明，古代的某些鱼类和植物并非现存物种，基本已经灭绝。因此，我们相信海洋中有动物存在的时间不会早于陆地植物存在的时间。尽管在海洋生物方面有更多有着非常显著特征的遗迹和佐证存在，但是陆地方面的佐证也同样可靠，它们似乎都在向我们彰显海洋生物和陆地植物中的古老物种都已灭绝，因为海洋和陆地上的环境一旦不再具有适应它们生存和繁衍必需的温度时，它们便会死亡。

第四节 洋流和火山对地形的影响

笔者曾经论述过，地球在长达3.5万年的时期都处于一团热气和火焰炽热的状态中，这个时期，任何有感觉的物种都无法在地表生存。之后，在1.5万年到2万年的时间中，地球只是一片汪洋。地球的演化总是需要一段漫长的时间，因为只有这样，地球才能慢慢冷却，洪水才能渐渐退去，地球各个大陆的表面才能逐渐形成。

但是，在海洋对地球产生作用之前，还有其他几个更普遍的作用，对整个地球表面的若干区域产生了影响。笔者曾经提出，大部分的洪水来自南极，把各大洲的南端冲尖；但是当洪水完全覆盖地表之后，当覆盖在地球表面的海洋保持平衡状态时，海洋自南向北的运动就停止了。此后，海洋只会在月球永恒不变的引力下才会运动，这种引力与太阳的引力结合在一起，就产生了潮汐以及经常自东向西的海流运动。

在洪水泛滥之初，先是从两极向赤道流去，由于两极地区的温度要低于其他地区，所以洪水就先在两极降落，再逐步向赤道地区扩展并将之淹没。当赤道地区和其他地区都被洪水淹没，洪水自东向西的运动也

就建立了，且恒久不变。这种自东向西的运动不仅在洪水没有退去的那段时间内发生，就是现在也依然存在着。海流这种自东向西的运动普遍存在，其产生的结果也是普遍存在的——将各个大洲的西海岸都堆积得高耸起来，在东海岸则形成平坦的斜坡。

当海水渐渐下降，各大洲的最高点开始显露出来之后，这些最高点仿佛许多被去掉塞子的风眼一般，开始向外冒出许多新的火焰，这些火焰是某些元素在地心沸腾形成的，它们还是火山喷发时的燃料。这种嬗变出现在第二阶段的末期，就是延亘2万年的地表汪洋期，这时的地球表面被水和火占据，它们一起吞噬、摇撼着大地，导致地球上没有一处安宁之地。幸好这一时期没有旁观者目睹这种恐怖情形，因为陆地生物是在这一阶段结束后才形成的。洪水这时已经退去（那时候欧洲和美洲两个大陆的北端还是连成一片的，这一点可以作为洪水减退的证明）。这个时候，火山的数量大大减少，因为它只有在水火交融时才会爆发，当洪水减退，与火山有一定的距离时，火山自然会停止爆发。我们可以再想象一下，地球在第二阶段刚刚结束时，也就是地球形成4.5万年至6万年以后，它会呈现一种什么样的景象呢？海拔比较低的地方全是深水滩、急流和漩涡；地下洞穴的坍塌伴随着海底或者地表的火山的频繁爆发，还有持续不断的地震；泛滥的洪水、溃决的江河以及在震荡影响下产生的洪流，再加上熔化的玻璃质、沥青和硫黄混合在一起的激流，共同摧毁着高山，然后流到平原，污染了平原上的水，天空中的太阳也被水气聚集成的云块和火山爆发带来的灰尘、碎石所形成的浓雾遮挡。对于造物主没有让我们目睹这种狂烈恐怖的景象，我们应该表示感谢，因为这些景象是发生在敏感而聪明的动物诞生之前。但从另一个角度来说，这些景象也预示着动物的诞生。

第五节 初民生活

最初的人类常常面临地球表面如同痉挛一样的频繁抖动，为了躲避洪水的侵袭，此时的他们只能栖身在高山上，可是，火山的频繁爆发又会迫使他们离开高山，他们只能无助地站在大地上，但脚下的土地一直在战栗着。

他们一无所有，甚至连最基本的智慧都没有生成，他们只能任凭大自然风吹雨打的灾害摧残，并承受猛兽疯狂的攻击，很多人因此丧生。在这样恶劣的生存环境和条件下，初民充满了恐惧和悲哀，他们逐渐意识到团结的力量，开始学着依靠聚集在一起的力量共同抵御大自然的侵害和猛兽的攻击，一起建造住宅、制造武器。此时的“武器”指的是将硬石块、玉石以及“雷石”（古代的人们认为雷石是由雷火构成，从云端掉下来的物质，实际上它不过是自然状态下人类艺术的最初成果）打磨成斧形。接下来，初民学会了利用火山的烈焰或者炙热的熔岩，并发现用石块相互敲击可以产生火花，于是将火苗到处传播，在森林或是荒野中创造出适宜自己生存的环境。他们用自己制造的工具把即将居住的地方清扫干净；用石斧削下树枝和树干，再截为木块，制造其他必需的工具或武器。初民既然能制造出大锤以及其他具备防御性的笨重工具，那么他们自然也能制造出更为轻便的武器，便于从远处击中目标。他们利用被击杀后的兽类身上的筋为绳，然后把一根富有弹性的树枝用这根筋绳连接起来，制成弓；再将一些小木块削尖，制成箭；不久之后，他们又制造出了渔网、木筏、小舟等东西。

如果初民的社会始终由几个家庭组成，或者是由一个家庭里发展出来的亲属组成，那么他们的社会无疑会停滞而无法走出原始阶段。因为直至现在，我们发现有许多野蛮人还在以这种方式生活着，只要他们愿意，就可以继续保持这样的生活状态，因为他们生活的地方有着足够的空间和充足的猎物、鱼类和果实，足以维持他们的生存。不过，那些生活在被洪水或者高山隔绝的地方的人们，如果人口过多，就只能去瓜分土地。所以，从这时起，土地成了私有财产。人们通过自己的劳动占有属于自己的产业，而这种占有活动也引发了对群体的依恋之情。个人利益逐渐成为民族利益的组成部分，秩序、规则、法律随之产生，社会也变得渐渐稳定，各种社会力量也就开始发挥作用。

然而，最初生活环境的恶劣以及各种灾害在初民的脑海中刻下了很深的印记，他们因此对这些苦难经历留存下持久甚至永恒的记忆，他们认为，人类难逃遍布全球的洪水和大火，要么被淹死，要么被烧死。他们曾经为了避难而逃到某座山上，并对这座山产生了感恩之情；但当他们看见这座山上喷出熊熊火焰时，又会对这座山产生恐惧之感；当他们

看见大地用水和火与上天做抗争时，便想象出许多神话；他们相信一定存在凶恶的神祇，这是形成迷信和畏惧的根源。初民的所有这些情感,都是建立在恐惧的基础上，因此它们牢牢地盘踞在人们的心灵和记忆中，哪怕经过了漫长的时间和经验的积累，经过了暴风雨之后的宁静，哪怕是了解清楚了大自然的活动和所能造成的结果，人们的心依然无法完全安静下来。

第六节 科学与和平

从人类把自己的力量与大自然的力量结合在一起，并把这种结合的大部分扩展到地球上时，到现在不过是三千年左右的时间。在此之前，地球的许多宝藏都被深深隐藏着，直到人们在与自然的共处中慢慢发现并将之挖掘出来。尽管还有许多埋藏在更深处的宝藏没有被发现，它们到最后应该也无法逃脱人们的搜寻，而成为人们劳动的成果。因此，不管是什么时候，在什么地方，只要人们安守本分，大自然给予的恩赐就不会少一分，就能在大自然提供的宝藏中选择对自己有用的或是能够满足自己需要的一切物品。

人类凭借自己的智慧驯养、驾驭、征服了许多其他动物；人类依靠自己的劳动对沼泽进行治理、对河道进行疏通，消除了险滩、激流，开垦荒地、开发森林；人类通过自己的思考，计算时间、测量空间，对天体运行的情况做描绘，将天地与地球进行比较，扩展对宇宙的认识；人类依靠在科学基础上建立的技术，横渡海洋、跨越高山，缩短了世界各地人们间的距离，新的大陆和岛屿被不断地发现，一步步扩大人们的居住范围。总之，今天的大自然样貌，处处都留存有人力的痕迹。

人力尽管是自然力衍生出来的，但其表现出的力量往往比自然力更加伟大，或者说，它通过奇妙的方式对大自然进行了改造。大自然能够得到全面的发展，能够进展得如此完善和辉煌，可以说都是人类力量的作用。

所以，如同我们将原始状态下的大自然，与人类改造之后的大自然

进行比较；或用少数野蛮种族，与多数文明民族进行比较，通过研究他们生活所在的土地状况，便会发现他们之间存在的差别，少数野蛮种族对遗留在土地上的认知痕迹很少，这是由于他们的愚昧或懒惰造成的。这些半野生状态的种族无法为改造大自然出力，某种程度上是大自然的负担。他们只会破坏，而不会建设；只会消耗，而不会创造。有许多的乐土遭到他们的蹂躏，乐土上刚刚萌芽的幸福被他们摧毁，科学的成果也被破坏。我们通过翻阅各国的历史，可以看到里面有大量的篇幅记载的是两千多年来的战祸，而对和平生活的记载只有少量的篇幅和短短几年的历史。

大自然为了使地球表面成形并达到稳定状态，为了使地表温度由炽热降低到适合生物生存，已经耗费了长达六万年的时间。但是，人类要达到安定状态，不再相互残杀、相互敌视，需要耗费多长时间呢？要到什么时候，人们才能领悟到和平安静的生活才是真正的幸福呢？什么时候他们才能够控制自己的欲望，放弃痴心妄想，变得足够安分，同时放弃弊大于利的远方殖民地呢？西班牙帝国拥有的国土面积与法国相差无几，但他们在美洲的殖民地面积却是法国的10倍，这能够表示西班牙的国力是法国的10倍吗？我们甚至还可以深入思考一下，西班牙倾力于远征开发海外殖民地的结果就一定比尽量开发本国资源更能让自己变得富强吗？英国原本是一个具有绅士风度而深谋远虑的国家，但他们也在海外大肆开辟殖民地，这不是在犯严重的错误吗？相比现代人对殖民活动的观点，古人的看法更为准确和科学。古人的殖民活动，只会在他们的人口数量超过土地的负担时，在土地和商业供不应求时才发生。现在，但凡说到蛮族南侵，人们就会觉得非常后怕，而事实上，当时蛮族的活动范围仅仅是一些气候寒冷、土地贫瘠的地区，而靠近他们生活区域的都是肥沃的土地，那里可以为他们提供更好生活所需的一些资源，因此他们才会多次南侵。虽然有这样掺杂了生存需要的理由，但他们的南侵也确实造成了血腥的杀戮。

这些与死亡相伴的血腥事件往往都是出自愚昧，我们没有必要再对这些悲惨历史进行讨论，我们希望每一个文明民族之间的力量可以相互制衡，尽管这并非完美状态，但却可以维持我们想要的安定状态。当人们对自己的真正利益有了更正确的认知，并因此变得稳定时，我们希

望，人们能够明白和平与安宁所具备的真实意义，把它们作为目标，并为实现这个目标努力奋斗。因此，笔者也希望君主们能够放弃成为征服者的欲望和虚荣，不受谋士们名利思想的蛊惑，因为他们只不过是通过怂恿君主去外侵内敛以求自己从中牟取利益。

我们假设世界处于和平的状态，然后认真研究一下人力对自然究竟会产生什么样的影响。我们已经讲述过，地球的温度是在慢慢下降的，如果想对这种趋势加以改变，让地球的温度逐渐回升变暖，只有人类的力量才可以做到，并且已经做到了。巴黎和魁北克所处的纬度几乎相同，如果法国也像加拿大一样人烟稀少、遍布森林，那么巴黎会如同魁北克一样寒冷。对生态环境进行改善，开辟草地、迁徙人口就可以令一个地方的温度在数千年内保持恒定状态，这一点可能是人们对于笔者提出的“地球冷却说”（准确地说，是地球逐渐冷却的事实）表示疑问的唯一合理解释。

一定会有人在这时候提出疑问的，比如他们会问：“根据你的这种说法，现在整个地球的温度应该比两千年前低，但一些传统事例被发现为我们提供了相反的证据。在古代，高卢（法国古时的称谓）和日耳曼（德国古时的称谓）都有麋、大山猫、熊等动物的活动踪迹，但后来这些动物都迁徙到北方去了，这种向北移动的趋势，与你原来设想的由北到南的进程完全不同。而且，以前塞纳河每到冬季都会有一段时间结冰，但现在却不会了。这些事实不都在说明‘地球冷却说’并不正确吗？”笔者不否认这些事实的确存在，也与“地球冷却说”相悖，但如果现在的法国和德国还如同古代高卢与古代日耳曼一样；如果人们没有开垦荒地、疏通江河，没有以人力对大自然进行改造，这些情况就不会出现。人们难道不应该思考一下，地心热的减退，是缓慢到无法体会的程度吗？不应该认真想想，地球表面的温度下降到现在的温度，已经耗费了七万六千年之久吗？不应该仔细思忖，哪怕再经历七万六千年，地球也不会冷却到令生物无法生存的地步吗？除此之外，我们难道不需要把这种缓慢的冷却，与空气中出现的极速的寒冷气流进行比较吗？我们应该记住，夏天的最高温与冬天的最低温相差不过三十三分之一。这样，我们就能明白，外在的各种因素对温度的影响要远远高于内在的因素，高空寒气被潮湿吸引而下或被风压到地面等特别的原因，对气温下降的

影响远比让地球冷却的因素大得多。

由于生物的一切运动或动作都会产生热量，加之只要是具有新陈代谢的生物本身都可以是一个小型放热器，因此，当其他一切条件都相同时，某一个地方温度的高低会由人与动物的数量和植物的数量之间的比例所决定，因为人和动物向外散发热量，而植物却是释放冷气。此外，人们对火的利用习惯也令人口密度高的地方的温度大幅上升。在巴黎的寒冷季节中，圣豪诺勒郊区的温度要低于圣马索郊区，大约相差两三度，这是因为圣马索郊区的人口比较稠密，烟囱中散发的热量被经过这个地区的北风吸收掉，因此这个地区的温度比较高。在相同的地区，存在的森林的数量也会使温度发生变化，因为只要是活着的树木就会吸收太阳的热力，然后释放湿气，湿气再形成云朵，最后以雨的形式落到地面，云层越高雨就越冷。如果这些树木都是以自然状态生长，那么当它们老死后，会在地上慢慢腐朽；如果这些树木被人类拿到手中，将会成为取暖的材料而被烧掉，从而使这一地区的温度上升。

温度的不同决定了大自然的能量大小，一切有机体的生长和发育，甚至整个生命都是总因的特殊效果。因此，人类控制总因，改变温度，既能消除对自己不利的东西，还可以培育对自己有利的东西。有些地域构成温度的多种因素能够保持在一个平衡点，并且可以完美结合在一起，发挥出很好的效果，这是多么奇妙！不过，没有任何一个地方是一开始就具备这种条件的，更不存在一个不用发挥人力作用就能疏导水流、除掉害草、驯养动物并繁殖有用动物的地方。人们从生活在地球上的300种兽类和1500种禽类中，择优选出了20种禽兽进行驯养，它们是象、骆驼、马、驴、黄牛、绵羊、山羊、猪，狗、猫、骡马、南美羊、水牛，鸡、鹅、火鸡、鸭子、孔雀、雉、鸽子，这是在自然界中占比较大的20种动物，它们为人类带来的益处，要比其他禽兽多。它们的数量之所以庞大，是人们将其驯养并辅助它们大量繁殖。它们按照人类期望的形式贡献出自己的能量，或者耕地，或者运载重物和用于贸易，或者为人类的衣食提供资源。总之，它们满足着人类的一切需要，为人们提供各种服务，甚至享乐。

在人类选出的这些禽兽中，鸡和猪的繁殖能力最强，在地球上分布的范围也最广，这仿佛可以说明，旺盛的繁殖力能够跟各种环境进行抗

争，从来不会害怕困难，就算是最偏僻的地方，甚至人迹罕至的岛屿，人们依然能够发现鸡和猪的影子，看上去它们应该是随着人类的迁徙而转移的。在与世隔绝的南美洲，当其他任何一种家畜都没有被放进去时，人们就已经发现了贝卡利猪和野生鸡在这里生活的踪迹，它们在体形上尽管比欧洲的猪和鸡略小，外观上也有所不同，但它们都属于相似的种类，可以接受人类的驯养。不过，南美洲的野蛮人对于群居是没有概念的，他们也不喜欢与鸟兽为伍，更不会饲养任何禽兽，他们区分不出禽兽中的哪些是优质品种，更不知道如何让这些禽兽大量繁殖。因此，尽管他们周围就生活着繁殖力很强的动物，比如属于鹌鹑类的合科鸟这种，只需要花费稍许的精力喂养，就能够为他们提供衣食资源，这远比他们艰辛打猎容易得多。

所以，懂得怎样控制禽兽是初民的第一个特征，这是能体现人类智慧的特征，它正慢慢演化成人类统治自然界的最伟大的力量。因为，只有人类驯服了禽兽之后，才能借助于它们的力量对大自然的面貌进行改造，把荒原变成良田，将一些野生植物变成有益人类的良木。在对有用的禽兽进行培育时，也增加了人类在大地上的运动量和生命量；通过培育植物来养育动物，又通过培育的动物和植物为自己提供生命所需的能量，不仅得以生存和延续生命，还让动植物传播开来，同时进一步提高了自己的生存技巧。人类的努力改造让大自然变得富饶，同时也促进了人口的增长，比如在场地上，古时只能容纳两三百人的空间，现在已经可以让几百万人在一起共同生活；以前某些几乎不会有禽兽生活的地区，现在已经繁衍了成千上万只。

现在被我们当作粮食的谷类，并非大自然的恩赐，而是人类发挥自己的智慧得到的伟大而有益的成果。我们在大自然的任何地方都不曾找到过野麦，显然这是一种经过人类改良之后才形成的草。因此，如果想要得到它，首先需要对千万种草进行辨别，选择出这种对人类生存有重大意义的草，然后进行播种、收获，经过无数次的试验之后，掌握它们的施肥量和耕种期。小麦尽管与其他一年生植物一样，长出果实之后就会枯萎死亡，但它的幼苗具有相当强的抗严寒力，令它几乎可以在多种气候下适应成活，并且，它的果实能够储藏很长时间不会坏掉且长久保持繁殖力。这些都足以证明小麦是人类有史以来最伟大的发现，而且也

证明，在发现小麦之前，人类就已经掌握了耕种技术，而且这种技术是建立在经过了长时间的试验基础之上的。

关于人类是否确实可以改变植物性能这一情况，假如有人希望笔者列举出一些近代，甚至现代的例子，其实只用将现在的蔬菜、瓜果和花卉拿出来，与150年前同品种的蔬菜、瓜果和花卉进行比较就可以了。大约在加斯东·德·奥尔良（法国国王亨利四世之子，路易十三的哥哥）时代，法国就有人开始编制一部彩色的大花谱，直到今天，这部花谱依然在皇家花园继续编制。根据它的记载，我们在进行前后对比后惊讶地发现，在加斯东·德·奥尔良时代被誉为最美丽的花卉，如丁香、马兰、熊耳等，在今天的花农、园丁和花商们的眼中变得很普通，甚至不值一提。虽然这些花卉被培植的时间很早，但它们好像还没有从自然状态中脱离出来，依然只有单重花瓣，雌蕊细长，颜色不生动，没有茸毛，也没有光泽和变化，这些都是其野生状态下的显著特征。至于蔬菜，当时仅有一种菊苣和两种莴苣，而且品质都不好；而现在，我们能够见到的菊苣和莴苣就有50多种，且都可供食用。同样的道理，那些优质的水果，出现的时期距离我们都比较近，而且与古代的水果存在很大的差异。一般来说，现代的物品与古代的物品相比，尽管它们有着相同的名字，品质却发生了很大变化。为了进一步证明这样的观点，我们可以与古希腊作家笔下的花卉和果实与现在的花卉、果实进行比较。在古希腊时期，花都是单层的，果树也只是一些品质差的野树，结出来的果实很小，且酸涩而干枯，既没有现代水果的多汁多味，更没有现代水果的美丽外观。

然而，这并不代表野树中不能培育出这些品质优良的品种。如同培育小麦一般，人们为了从野树中挑选出优良品种，曾经无数次地对大自然进行考察，将成千上万棵幼苗栽培到土地中，然后慢慢将它们培育出来。人们只有反复播种、培育幼苗，才能让它们结出果实，再通过品尝挑选出可以结出甜美果实的树。人们为这种初步探索耗费了无数精力，但如果不进行更深入的探索，那么之前的努力就会付诸流水。因为在初步探索中挑选出来的几棵树极有可能无法繁殖出像它们一样优质的小树，而且无法将优良品质遗传下去，由此说明，优良品质属于个体特征，而不是群体的普遍特征。因为那些优良的果实，它们的籽或核只能繁殖出野树，无法形成与原树不同的新品种。正如初步探索需要耐心一

样，深入探索则需要天才的力量。所谓“天才的力量”就是人们掌握了接树法，将那些优质的树做嫁接。运用接树法，可以选出第二类品种，还可以将这类品种进行推广和传播。人们将品质优良的树上的苞芽或小枝剪下来，接在台木（被接的植物体）上，然后对它们做悉心的培育，让它们结出的果实与母体结出的果实相同。虽然这些树苗嫁接在并不十分优良的台木上，但却不会遗传它们的低劣品质，因为台木不是这些树苗的母体，只能称作“乳娘”，台木的作用只是为幼苗输送养料，使它们能够更好地成长。

在动物界中，许多表面看起来属于动物个体的特性，其实常常是属于种族的特性，可以通过相同的方式遗传并延续。因此，人类的能动性对动物品性的影响要比对植物品性的影响大得多。对于动物而言，物种只不过是具有一些固定的变形，而这些变形都是以生殖方式延续的；对于植物而言，则没有任何物种的变形能固定到通过生殖进行延续。我们以鸡类和鸽类为例，人们在近现代培育了大量鸡和鸽的新品种，这些新品种本身都具有繁殖后代的能力；在其他禽类中，人们也是通过杂交方法进行品种改良培育。人们还常把外地品种移植到本地品种，或者驯养野生品种。这些现代的事例都表明，人类在很久之后才意识到自己强大的力量，只是这种力量还没被完全挖掘出来。人类依靠智慧发挥自身的力量，因此，我们越是深入研究自然，就能有越多的办法利用它，发掘出它内在的更多财富。

综上所述，人类的意志如果可以一直受智慧的指引，那么就没有什么事是人类不能够做成的，无论是精神上还是肉体上，只要人类更好地对自己的自然品质进行改善，就可以将自身的能力发展到难以想象的地步和更为崇高的程度。

但是，全世界没有一个国家可以夸口说自己已经发展至完美。笔者认为，政治的终极目的是通过和平、富有、生活福利等来保障人民的生存，珍惜人民的血汗，让全体人民可以生活在虽然不是绝对平等的幸福，但也不是绝对不平等的不幸之中。现在，哪个国家实现了这一点呢？至于保证人类生存健康的医药和以维持人类基本生活为目的的科学技术，是否与以战争为目的而研制出来的技术获得了同样的进步呢？从过去到现在，人类在行善方面似乎总是考虑得太少，而在作恶方面思索

得太多，这个结果的出现，最可能的原因是，在所有对群众具有感染力的情感中，恐惧起到的作用最强烈而有力。因此，丑恶艺术表现出的震撼会首先吸引人们的目光；其次，才会关注能够引发人们开怀大笑的人。只是到了后来，人们逐渐厌烦了这种长久的虚幻荣誉和无聊欢笑，领悟到科学才是真正的荣光，和平才是真正的幸福。

附：布封的进化观

研究宇宙和物种起源是布封一直致力进行的，他坚持物种具有可变性这一观点，并由此提出生物转变论，以及“生物的变异会受到环境的影响”的理论，指出物种会因为环境、气候、营养等条件的影响而出现变异。布封的理论，对后来的进化论产生了重要影响，达尔文因此将他称为“是现代以科学眼光对待这个问题的第一人”。

第一节 物种退化

人类在迁徙的过程中，从一个地方到另一个地方，其本性会出现一些变化，而且随着迁徙地与起源地的距离拉长，本性的变化也会加大。在过去的几个世纪中，人类的足迹留在了好几个大陆上，人类的后代有了巨大变化也就不足为奇。但是，假如我们的意识中没有大自然仅创造出一个人类的观念，我们就可能认为黑人、拉普兰人及白人是不同的人类，事实上，这三个人种之间，在肤色和生活习性方面尽管都有着很大的差异，但他们却能够和平共处，为促进人类大家庭的发展贡献力量。因此，他们的肤色一开始应该是相同的，出现的差异只是外在的，本性的退化仅仅是表面现象而已。不管是在赤道地区或者非洲丛林生活的黑人，还是在北极寒冷地区生活的棕褐色小矮人，他们都来自于同一个人类。

约在250年前，美洲开始出现被贩卖的黑人，但当时人们并没有意识到，与最初的状态相比，那些纯种黑人的肤色已经发生了变化。南美洲地区日照强，气候炎热，即使一直在这里生活的原有居民，他们的肤色也都变成了褐色，诚然，居住在那里的黑人的皮肤还是黑色的，但这并不令人觉得诧异。如果要对人种的肤色进行研究，可以将在塞内加尔生活的黑人带到丹麦，因为丹麦的人种普遍都是白色皮肤、蓝色眼睛及金色头发。这种情况下的血缘和肤色的差异才更加显著。如果要进一步

确定恢复人的本来面目需要多少时间，我们能够采用的唯一方法，就是把黑人男性和黑人女性关在一起，确保他们不出现与其他人种混杂，进而保证他们人种的纯正。

牛是所有家畜中受食物影响最大的动物。生活在土地肥沃、草木茂盛的牧场中的牛，其体形硕大强壮。古人曾经把在埃塞俄比亚和亚洲地区生活的牛称为“牛象”，因为在那里生活的牛的身躯已经可以与大象相提并论，这是营养充足的证明。欧洲也有相同的情况，在瑞士或者萨瓦省山间牧场生活的牛群，它们的体积是生活在法国的两倍。尽管瑞士牛和法国牛一样，大部分时间都是被关在牛棚中吃草料的，但在瑞士，一旦冰雪融化，放牧人就可以把牛群赶到牧场上，而法国的某些省份则一定要等到将喂马的草料收割完之后，才准许牛群进入草场。因此，这些牛群一直得不到充足的食物。在这一点上，笔者认为我们的国家应该意识到这一点并制定相应法规，保证充分利用草场。此外，气候也是会影响牛的外形的，在温度低的北方，御寒的本能会让牛的身上长满细长如羊毛一样柔软的毛，肩部还会有一块厚厚的皮脂。在亚洲、非洲、美洲等地的牛的身上也曾出现这种特征，只有欧洲的牛没有出现这种“驼峰”，而没有“驼峰”就是牛类的最原始种属具有的特点。原始牛类经过第一代或是第二代的杂交之后产生了拥有“驼峰”的牛，这说明它们只是原始种类的变异。除了“驼峰”，牛类在体积上的变化也存在不同，如埃塞俄比亚的“牛象”的体积是阿拉伯半岛的瘤牛的体积的十倍。

总的来说，就那些以青草或水果为生的素食动物而言，它们的本性受食物的影响非常大，而且效果也很明显；相反，食物对肉食动物的影响则较小，而受气候的影响非常大。我们以狗为例，食物对它的本性的影响很小，但气候的变化却与它的退化存在紧密联系。在热带地区生活的狗，浑身都是光秃秃的，而在寒冷地区生活的狗身上则有着厚厚的皮毛；在西班牙，狗的皮毛柔软光滑，如毛毯一般；在叙利亚，狗的皮毛像绸缎一样。导致狗发生变异的因素，除了气候因素之外，还有它们的生存环境、圈养程度，甚至与人类之间的关系等。而狗的身材，外在的尾巴、耳朵、嘴等，也往往受到人类的影响发生改变，那些被人类将耳朵、尾巴剪短之后的狗，其缺陷会遗传给它们的下一代。笔者曾见过出生时就没有尾巴的狗，一开始还以为这是狗类中的特例，后来才知道确

实存在这样的物种，并且是遗传，一代一代都会这样。

是否所有的狗都以垂下耳朵来表示驯服呢？经过观察和研究，得出否定的答案，在30多个不同品种组合狗中，有两三种始终保持耳朵竖立的最原始的姿态，比如生活在北方的牧羊犬、狼狗等都具有这种特征。此外，现在的狗在声音方面的变化也很大，变得与长舌类动物一般，喜欢冲着人吠叫，将舌头的功能最大限度地发挥出来，而原始状态中的狗几乎是事实上的哑巴，只会在情况异常时吠叫。我们有理由相信，狗是在被人类圈养及与人类的交往过程中学会吠叫的。如果人们把狗放到气候奇特、只有土著人居住的地方，如拉普兰人或者黑人生活的地区，它们就会丧失吠叫的能力，逐渐恢复到原始状态，甚至有的会变得哑口无声。牧羊犬是耳朵保持竖立的狗中变化最小的，通常也是最沉默的，这是因为它们总是在原野上孤独地生活，打交道的也只有羊或是少数的牧人，而牧人常常处于严肃的安静状态，所以尽管牧羊犬有时会表现得很聪明、很活跃，但它们多数时候都像牧羊人一样安静沉默。牧羊犬是所有狗中最能体现自然特性的，受到的驯化最少，但服从性高，而且是为人们守护畜禽的好帮手。因此，我们需要对这样的品种进行数量上的扩充，而不是增加宠物狗的数量。在很多城市，宠物狗已发展得太过惊人，它们消耗的食物资源，甚至能够养活很多的贫困家庭。

人类对动物的人工喂养，也会让动物的颜色产生一定的变化。原始状态的动物，其颜色主要是浅黄褐色或者黑色，但现在，动物的颜色有了很大的不同，甚至有的猪都由黑色变成了白色。动物退化的终极标志就是全身纯白和没有任何斑点，这样的动物会有许多缺陷。人也是这样，比如有些肤色比正常人更白的人，如果他的头发、眉毛以及胡须天生就是白色的，常常就会伴生耳聋、红眼、弱视等缺陷；而对于黑人来说，毛发花白的黑人要比正常黑人更加虚弱和更易出现身体缺陷。

在对每个物种由于特殊变化产生变种进行观察和研究之后，我们应该关注物种本身的变化这一重要因素。这种变化，是出现在动物的每一科属中更为久远的蜕变。陆地动物中，只有少数几种动物既是种又是属，这个特征与人类相同，如大象、犀牛、河马、长颈鹿等动物，它们都只会直系繁殖，不会形成旁系的单独的种和属；其他动物则常会先有一个主要的共同主干的科，然后再从这些主干上衍生出许多分支，分支

越多，表明物种的个体越小，繁殖能力越强。

按照这种观点，马、斑马和驴属于同一科中的三种动物。我们假设马是主干，那么斑马和驴就是分支。三者之间的相似的地方远远超过它们间的差异，所以我们可以将它们视为同一属。它们之间有着显著的共同特征：仅有的奇蹄动物，只有一个蹄，没有脚趾和趾甲。虽然它们形成的是三个不同的物种，但彼此之间的联系较为紧密，因为公驴与母马能够交配繁殖，而公马和母驴同样也能交配繁殖。如果斑马可以被我们驯服，让它变得温驯一些，它也同样可以与驴或马进行交配繁殖。

在我们的认知中，骡子始终是劣等的杂交物种，是两个物种混合形成的产物，它自身无法繁殖，所以不能成为一个系统。实际并非如此，骡子不是因为受到严重损害导致生育力丧失，它之所以不能生育仅仅是一些外在的和特别的因素所致。据我们所知，骡子多数生活在气候炎热的国家或地区，但在气候温的地区也能生养。然而，对于它们的生养繁殖是否只是公骡和母骡的简单结合，或者是公骡与母马的结合，甚至是公驴与母骡结合，我们并不清楚。公骡有两种，一种是大公骡，又叫作马骡，这是公驴与母马交配后繁殖的；另一种是小骡子，这是公马与母驴杂交的产物，为了便于区分，后者被称为驴骡。古人对这两种骡子早有认识，还用不同的称呼对它们加以区分，他们认为母骡容易受孕，却很难保住胎儿，虽然母裸生育的例子也存在过，但被人们认为是一种奇迹。那么，这到底是自然界中的奇迹，还是个例呢？在什么样的情况下，公骡才会有生殖力，母骡才能受孕生产呢？要解决这些疑问，需要我们进行相应的实验，以了解具体情况，获得新的依据，进而更好地认识通过杂交引起的退化，以及每个属的单一性和多样性。成功的实验，需要让大公骡分别与母骡、母马、母驴交配，再让驴骡也进行同样的交配，看看这些不同动物间杂交后是什么结果；同时，还要让公马和公驴再分别与母骡、母马骡和母驴骡交配。这些实验做起来都不难，但人们并没有实际尝试过。笔者大胆推测，以上的实验如果真正进行了，公马骡和母驴骡、公驴骡和母马骡的交配会失败的；而公马骡和母马骡、公驴骡和母驴骡的交配可能会成功。由此，笔者也相信，公马骡和母马交配比公驴骡和母驴交配的成功可能性更高，而公马骡和母驴交配又比公马骡和母马交配的成功可能性更高。最后，公马和公驴都能与母骡交

配，只是相比公马，公驴的成功性更大。这些实验需要在气候炎热的地区实施，在法国的话，最起码是在普罗旺斯东部，而且需要选择七岁的公骡，五岁的马以及四岁的公驴，这是因为三个物种的青春期存在一定的差异。

上述所举的这些例子，让我们明白，骡子不是丧失了生殖能力，而是只有少数骡子在生殖力方面有所欠缺。不过，公山羊和母绵羊的杂交品种却具有繁殖力；多数的杂交鸟类也能够繁殖后代。因此，马和驴属于一种特殊情况。

马和驴杂交产下的骡子，与其他动物一样拥有完整的生殖器官，它们什么都不缺。公骡体内蓄积的精液众多，由于人们并不经常让它们交配，所以它们往往就躺在地上，两只蹄子屈在胸前不停地摩擦，不受控制地将精液射出体外。这充分说明此类动物具备了交配的所有必要条件。无论是母骡、母驴和母马，都会让公骡产生性欲，而且总是来者不拒。所以它们的交配并不会存在什么阻碍。如果人们想要得到有繁衍能力的交配，便需要给予这些交配动物更为细心的照料。太过强烈的性欲，特别是对雌性来讲，往往会导致不孕，而母骡和母驴的性欲都过强，因此受孕的难度比较大。研究发现，母驴对公驴的精液常常抗拒，想要它顺利受孕，就必须在交配之后打它几下或朝它的屁股上泼凉水，平复其交合后发生的痉挛，因为正是这种痉挛造成了母驴对公驴精液的排斥。导致公驴和母驴的不育不孕还有其他原因，由于它们最初是在气候炎热的地区生活，当来到寒冷的地区后，生殖能力受到变化的影响就会下降，跟我们前面所讲的气候对动物的影响是同样的道理。也正是这个原因，人们总是让它们只在夏季交配，若是其他季节，特别是冬天，就算反复多次，仍然无法让母驴成功受孕。合适的时间不仅对受孕有利，在生育方面也很重要，小驴驹如果不是在炎热的天气中降生，很容易夭折或身体脆弱。母驴的孕期恰好是一年，因此它的受孕季节和生育季节是相同的，这再次说明了气候条件在动物的生殖和生存中，发挥着非常重要的作用。由于雄性极容易冲动，所以人们总是在雌性产下小驴驹后就马上让其与雄性交配，这样，母驴在生育和交配之间仅仅只有短短几天的间隔。但是，母驴会因为生育而变得非常虚弱，而且生殖器官也没有足够的恢复时间，母驴的性欲因此降低。所以，方式并不是最重

要的，只有在母驴体力充沛、精力旺盛时，受孕的成功率才最高。有一些人以为，驴类似于猫，雌性的性欲要比雄性的性欲强烈，可是，雄性驴子却不是这样的情况，它可以连续几天或一天多次与雌性进行交配，它经久不衰的欲望，往往让它在交配中表现得无比急切。这就导致有些雄性驴子因为精疲力竭而难以再次兴奋；有些虽然能在半天之内反复交配，仅依靠喝水来补充体力，往往会因为消耗太大而累死。炎热的气候也会让种驴过多地消耗体力，不久就败下阵来。有人因此推测，雌性驴的寿命要比雄性驴长，而且身体更为健壮。雌性驴的寿命大约是30年，而且每年都能生育；但对雄性驴来说，如果不对它的交配进行人为限制，短短几年内它就会耗尽自己的精力，从此失去生殖力。

第二节 飞虫社会质疑

在比较了人的个体和动物个体之后，笔者也对社会中的人和成群的动物进行了一些比对。这些比较让我们发现了最多的、最低等的动物所具有的某些技巧以及形成这些技巧的原因。因为我们还没有涉及与一些飞虫相关的许多情况，笔者想在接下来用多一点的篇幅谈一下，为什么许多观察家会对蜜蜂的智慧和才能如此赞不绝口。

一些观察家经过细致观察，发现蜜蜂拥有一种特殊的才能，这种特殊的才能也是蜜蜂独具的艺术才能。一个蜂群好比一个王国，它们的所有劳动都以公正严谨、令人叹服的方式进行分配和安排，每个个体兢兢业业地工作且服务于一个集体。就算一些真正的人类国家在安排和分配上也可能不如蜂群这样文明和有条理。我们对这个飞虫群体观察的时间越长，这个世界呈现在我们面前的奇妙就越多。在蜂群中，其管理基础持久不变，每个个体都深深尊敬自己的岗位。更让我们叹服的是，蜂群对集体的热爱之情，对工作的无私奉献，彼此之间的亲密和谐，以及它们所掌握的用于最典雅建筑的最精确的几何学等。只需要稍稍翻阅一下对这个“共和国”编年史的记载，就会明白，赢得历史学家赞叹的、从这些昆虫身上学到的特点不可计数。

但是，我们对这些昆虫的赞美似乎夸张了一点，或者换句话说，人

类对昆虫的赞美已经超过了对其他物种的赞美之和！我们对这些昆虫的精神关注，对它们在公共财产上表现出的热情以及对它们在建筑上的高超本领的认可，都显得没有什么道理！因为，蜜蜂实际上只是依靠本能在做事，以很快的速度解决了“在最小的空间中，通过最完美的布局，完成最坚固的建筑”这个问题。人们为什么会超出常理地把赞美给予这些昆虫呢？因为在博物学家看来，一只蜜蜂占据的位置，不应该比它在自然界中应占的位置大；而在另一些有理性的人看来，这个奇妙的王国除了只是一群提供给我们蜡和蜜的昆虫之外，与我们就没有其他关系了。

笔者这样讲并不是指责好奇心，而是对某些推理和无谓的赞美提出意见。笔者能够接受一位博物学家利用空闲时间对蜂群的活动进行仔细观察，或是留心它们的工作过程，并准确地描述蜂群的生育、繁殖和变化等情况；然而，笔者不能接受某些人所宣扬的关于昆虫拥有伦理学或者神学这类观念，因为这些仅仅是观察家们设想出的奇迹。况且，这些观察家自己也承认，孤单的飞虫与群居的飞虫间存在的差异是无法进行比较的，因为前者构成的小群体的数量要比大量飞虫形成的群体数量少得多。蜜蜂可能是所有飞虫中形成群体数目最多，也是最有才能的昆虫。这些事实，难道还不能说明某些人所谓的昆虫的精神和才能，只不过是机械性的结果吗？仅仅是与数量相对应的运动结合？事实上，从假设表象到假设智慧，仅仅只是一步而已，为什么人们只会赞叹而不进行更为深入的研究呢？

因此，对飞虫最好的研究，是分别观察飞虫的个体，这样就会发现，相比狗、猴子等大多数动物，飞虫的才能微乎其微。我们同时还发现，它们并非人们想象中的那般温顺、勤奋、重感情。综上所述，它们的优点远远不如人类。因此我们就可以得出结论：它们的大量聚集决定了它们的智慧，而这种聚集又不是以智慧为前提进行的。因为这种聚集不是出于精神意识，更不是意愿一致的体现。因此，这个群体只是在大自然的安排下形成的，与上述所有的认知、观点和推理无关。就好比一只母蜂在同一个地点、同一时间繁殖出一万个后代，哪怕这一万个个体是非常愚笨的，但它们只要想生存下去，就需要通过某种相互调节的方式达成共识，因为它们的力量相同且都是活动的。一开始，它们或许会相互残杀，但因为惨重的伤亡会让它们意识到这种方式是错误的，很快

就会选择避免彼此间伤害的方式，转向相互帮助。于是，它们营造出了和睦相处的气氛，建立了共同的目标且为这个目标一起努力。可惜的是，观察家们却把这些飞虫本身没有的思想和观点强加到它们身上，为它们的每个活动寻找理由，让它们的每个运动都有了目的，所以就出现了关于昆虫的“奇迹”。我们前面假设的一万个个体是同时出生、生活和变化的，所以不可能做着完全不同的事情，它们自身没有感情和共同习惯，也不会相互协调或彼此照料。因此，如果观察家们将观察到的这些现象归结为“共和国”、建筑学、几何学、秩序、预见，甚至上升到对集体的热情、对公众的敬业精神这样的高度，这难道不荒谬吗？其实，这些都是从观察家们的主观赞赏引申出来的事情。

实际上，大自然本身已经足以让我们惊叹不已，再加上这些人们发挥充分想象炒作出来的各种奇迹，大自然岂不是被我们这种愚蠢的做法虚构得更加伟大吗？假如答案是肯定的，这不是对大自的褒奖，而是贬低。那么，到底是什么人从上帝那里发现了最伟大的观念？他是那个看着上帝创造了宇宙和生命、按照永恒不变的法则建立自然界的人吗？还是那个始终在寻找上帝、并认为上帝是可以对一个拥挤不堪的昆虫王国进行统领的人呢？

自然界中，也有某些动物会对集体做理智的选择，相比只是以生理需求为原则而聚集在一起的蜂，这种情况下形成的集体更具智慧及有着更远大的目标，例如大象、海狸、猴子及其他一些动物，它们之间会经历相互寻找，再聚集，然后展开具有一致性的集体活动，当遇到危险时相互提醒、救援。如果我们像观察昆虫群体一样，仔细观察这些动物，我们就会发现与蜜蜂世界相似的很多的奇迹。但从本质上讲，这也不过是动物在生活上的相互配合。假如我们按照主观意识，将许多的同种动物聚集在同样的地方，也一定会形成许多科学合理的安排秩序和共同习惯（在前面关于驴、鹿和兔子的章节中我们曾经详细解释过这种情况）。因为所有共同习惯的形成，其前提条件只是盲目模仿，而不是因为运用了智慧。

对于人类社会而言，相比生理上的默契，对精神关系的依赖要大得多。人们最先意识到的是自己的力量、弱点以及无知。当他觉得无法在独立的情况下满足自己的多种需求时，便会意识到需要放弃独立状态下

不能满足的愿望，因为这样能够得到支配他人意愿的权利。他借助于造物主赐予他的智慧进行思考，分辨善恶，并牢牢地记在心中。同时，他还会发现，对于自己来说孤独是一种充满了冲突和危险的状态，而他需要的是和平和安全，需要将自己的智慧和力量与其他人的结合起来，从而使之变得更加强大。实际上，这种结合意识是人类与动物的最大区别，也是对人类的智慧和聪明最有效和理性的运用。人总是因为自己不够强大而忧心忡忡，但因为他可以对自己加以控制，克制欲望、服从法律，所以他能够统治世界。也正因为如此，他才很清楚，一个真正意义上的人就是知道与其他人团结合作的人。

毋庸置疑，所有的一切都对人类交际的社会化有助益。因为，不管一个集体多么庞大，文明程度有多高，都是由人类是否能够理智运用决定的。假如存在滥用的现象，那么就说明这个社会一定只是依赖自然的小团体发展而成。例如，一个家庭就是一个小团体，当这个团体变得越来越稳定时，相互之间的需求和依赖也会增多，这一点与动物有着很大的不同。人在刚出生时是赤裸、虚弱的，而且无法独立生存，他忍受各种痛苦，无法做出任何动作，更缺乏行动能力。他的生命能否得以延续，是由别人是否给予他照顾而决定的。经过很长时间之后，这种虚弱无力的童年时期才会结束，这也正是父母和孩子之间存在依赖关系的关键。在孩子渐渐长大的过程中，他在生理上需要获得的帮助会相应减少，甚至在完全没有帮助的情况下也能生存下去。相反，如果到了这个阶段，父母仍然继续无微不至地照顾，远远超过了孩子对他们的回馈（父母对孩子的爱总是比孩子多），这时候父母的爱就会显得盲目、过分和不理性。而从孩子的感受来看，只有在理智的发展中萌发出的感激，孩子对父母的爱才会变得强烈。

因此，在社会中，就算是一个家庭团体，也是以人类理性能力为基础建立的。不过动物社会是通过默契自由地聚集在一起的，所以它们建立的基础是以感觉经验为前提。

在动物的社会中，如蜂群这样毫无原因、毫无前提地聚集在一起的，不管结果如何，这种聚集显然并不是会捕杀它的人类在事前想过，或安排计划的，它们只是遵循着一种普遍存在的机械结构和造物主确定的运动法则。假如我们将由同一个力量控制的一万个自动木偶长期放在

同一个地方，由于它们的外形完全一样，而且做着相同的运动，一定会形成有规律的活动并引发平等的、相似情况的关系，因为它们运动的前提条件是我们假设的相等性和一致性。当然，由于我们为此设定了有限的空间，所以并列、体积和形状的关系在这些条件下就产生了。假如我们赋予这些木偶一些最小限度的感情，仅仅让它体会到自己的存在，这样有利于它维持自身状态并趋利避害，那么这个实验呈现在我们面前的结果就是：木偶们的运动变得不仅有规律、成比例，有固定的位置，还会对称、坚固，甚至会达到高度完美。因为在它们开始运动的时候，每个木偶就已经在寻找适合自己的方式，而这种运动和定位对其他木偶产生的影响是最小的。

版权信息

书名：自然史

作者：［法］布封/著

出版社：天津科学技术出版社

出版时间：2020年7月

ISBN：978-7-5576-8261-3

版权所有·侵权必究

紫图书库 | 8027
大师经典 | 028

布封的眼界超越了自己的时代，
更重新创造了我们眼前的世界，万物有灵且美！

- 1本书 = 40年光阴的打磨，近半个世纪的珍贵积淀
- 1本书 = 亿万年地球演化之旅，感受世间万物在历史长河中的演变
- 1本书 = 沉浸式自然博物馆，以大量实物标本做推论，万物闪烁灵性，生命演出大戏
- 1本书 = 5大学科知识，生物、人文、地理等方方面面的知识形象地展现
- 1本书 = 一场艺术与人文的盛宴，获得科学界、文学界和哲学界一致好评

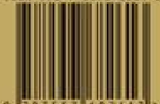
《自然史》展示了纯艺术家的人生态度，他以异常平静、悠然自得的语言歌颂自然界中所有的重要品物，呈现出造物的尊严与灵性，毫无疑问，布封拥有他那个世纪最美的文笔。

——法国思想家 让-雅克·卢梭



21世纪是博物学重新回归的时代，在环境、生态、文化面临前所未有的巨大挑战之际，我们需要更多跨越智识、心灵、视野界限的博物学家。此时此刻，重新阅读布封的《自然史》，有助于找出人类与自然的新平衡。

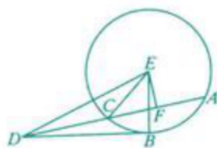




定价：55.00 元

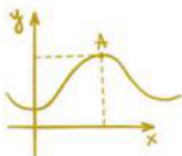
Euclid

Euclid´s Elements



$y=-\sqrt{\frac{1}{300}-\left(x+\frac{1}{2}\right)^2}+\frac{1}{2}$

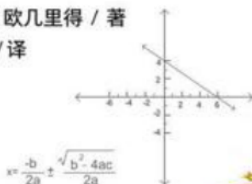
人类
理性的基石
爱因斯坦
推荐阅读



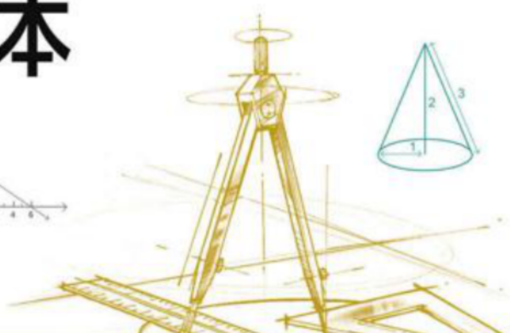
Elements

几何原本

[古希腊] 欧几里得 / 著
章洞易 / 译



$x=\frac{-b}{2a}\pm\frac{\sqrt{b^2-4ac}}{2a}$



2000年以来，出版1000版以上的逻辑巨著

数学、物理、哲学、科技……《几何原本》无处不在推动着人类文明的进程

初中生都能读懂的数学史诗，最有效的逻辑训练，让你拥有强大的思维逻辑

目录

卷I

卷II

卷III

卷IV

卷V

卷VI

卷VII

卷VIII

卷IX

卷X

卷XI

卷XII

卷XIII

卷I

定义

01 点没有可以分割的部分。

02 线只有长度而没有宽度。

03 一线的两端是点。

04 直线是它上面的点一样地平铺着的线。

05 面只有长度和宽度。

06 面的边缘是线。

07 平面是它上面的线一样地平铺着的面。

08 平面角是在一平面内但不在一条直线上的两条相交线相互的倾斜度。

09 当包含角的两条线都是直线时，这个角叫作直线角（即平角180°）。

10 当一条直线和另一条直线相交，形成的邻角彼此相等时，这些等角的每一个叫作直角，而且称这一条直线垂直于另一条直线。

11 大于直角的角叫作钝角。

12 小于直角的角叫作锐角。

13 边界是物体的边缘。

14 图形是被一个边界或几个边界围成的。

15 圆是由一条线围成的平面图形，其内有一点与这条线上的点连接成的所有线段都相等。

16 而且把这个点叫作圆心。

17 圆的直径是任意一条经过圆心的直线，在两个方向被圆周截得的线段，且把圆二等分。

18 半圆是直径和由它截得的圆弧围成的图形，而且半圆的圆心和原圆心相同。

19 直线形是由直线首尾顺次相接围成的。三边形是由三条直线围成的，四边形是由四条直线围成的，多边形是由四条以上直线围成的。

20 在三边形中，三条边相等的，称为等边三角形；只有两条边相等的，称为等腰三角形；各边不相等的，称为不等边三角形。

21 在三边形中，有一个角是直角的，称为直角三角形；有一个角是钝角的，称为钝角三角形；有三个角是锐角的，称为锐角三角形。

22 在四边形中，四边相等且四个角是直角的，称为正方形；角是直角，但四边不全相等的，称为长方形；四边相等，但角不是直角的，称为菱形；对角相等且对边也相等，但边不全相等且角不是直角的，称为斜方形；其余的四边形称为不规则四边形。

23 平行直线是在同一平面内向两端无限延长且永不相交的直线。

公设

01 由任意一点到另外任意一点可以画直线。

02 一条有限直线可以继续延长。

03 以任意定点为圆心，以任意长为半径，可以画圆。

04 凡直角都彼此相等。

05 同平面内一条直线和另外两条直线相交，若在某一侧的两个内角的和小于两个直角的和，则这二直线经无限延长后在这一侧相交。

公理

01 等于同量的量彼此相等。

02 等量加等量，其和仍相等。

03 等量减等量，其差仍相等。

04 彼此能重合的物体是全等的。

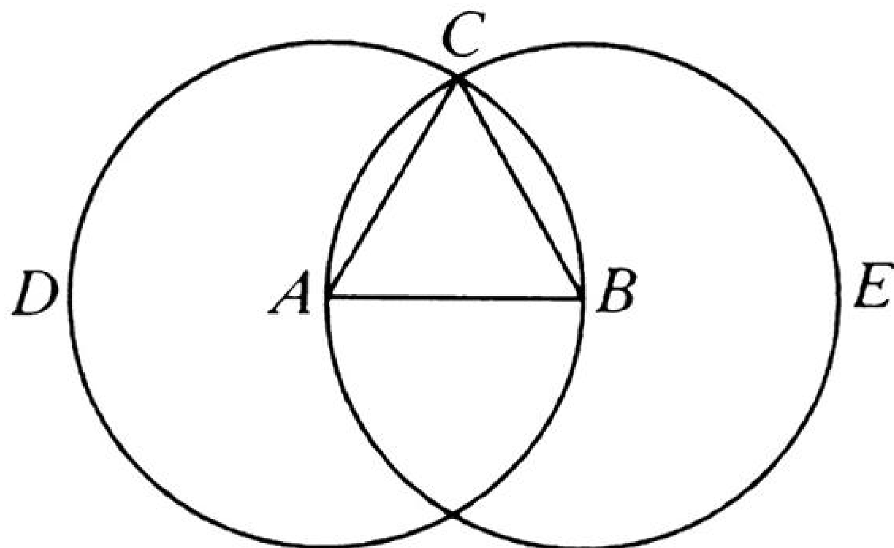
05 整体大于部分。

命题

命题1

…

在一个已知的有限直线上作一个等边三角形。



设：AB是已知的有限直线。

要求：在线段AB上作一个等边三角形。

以A为圆心，再将AB作为半径来画圆BCD。[公设3]

以B为圆心，再将BA作为半径来画圆ACE。[公设3]

从两个圆的交点C到A、B，连接线段CA、CB。[公设1]

因为：点A是圆CDB的圆心，因此AC等于AB，[定义15]

又因：点B是圆CAE的圆心，因此BC等于BA，[定义15]

并且之前证明了CA等于AB，因而线段CA、CB都等于AB。且等于同量的量相等，[公理1]

所以：CA等于CB，

所以：三条线段CA、AB、BC均相等，

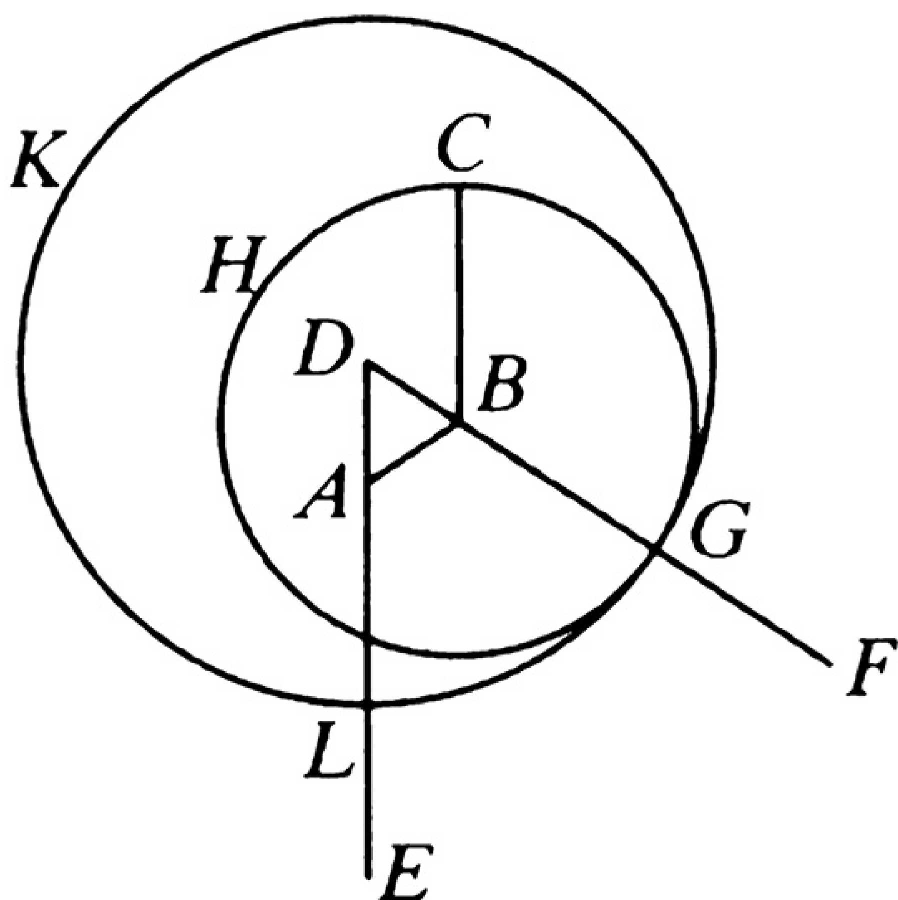
所以：三角形ABC是等边三角形，也就是在已经给出的有限直线AB上作了等边三角形。

这就是命题所要求作的。

命题2

…

将一个已知的点（当作端点），作一条线段等于已知的线段。



设：*A*是已知的点，*BC*则是已知线段，也就是，需要由点*A*作为端点，作一个等于已知的线段*BC*。

要求：从点*A*到点*B*连接线段*AB*，[公设1]

并且在*AB*上作等边三角形*DAB*，[I. 1]

再延长*DA*、*DB*为直线*AE*、*BF*，[公设2]

以*B*为圆心，将*BC*作为半径画圆*CGH*，[公设3]

之后再以*D*为圆心，以*DG*为半径画圆*GKL*。[公设3]

因为：点*B*是圆*CGH*的圆心，所以*BC*等于*BG*，[定义15]

点*D*是圆*GKL*的圆心，所以*DL*等于*DG*，[定义15]

又因：*DA*等于*DB*，因此剩下的余量*AL*也就等于余量*BG*，[公理3]

并且已经证明了*BC*等于*BG*，因此线段*AL*、*BC*都等于*BG*，并且因为等于同量的量彼此相等，[公理1]

所以：*AL*也就等于*BC*，

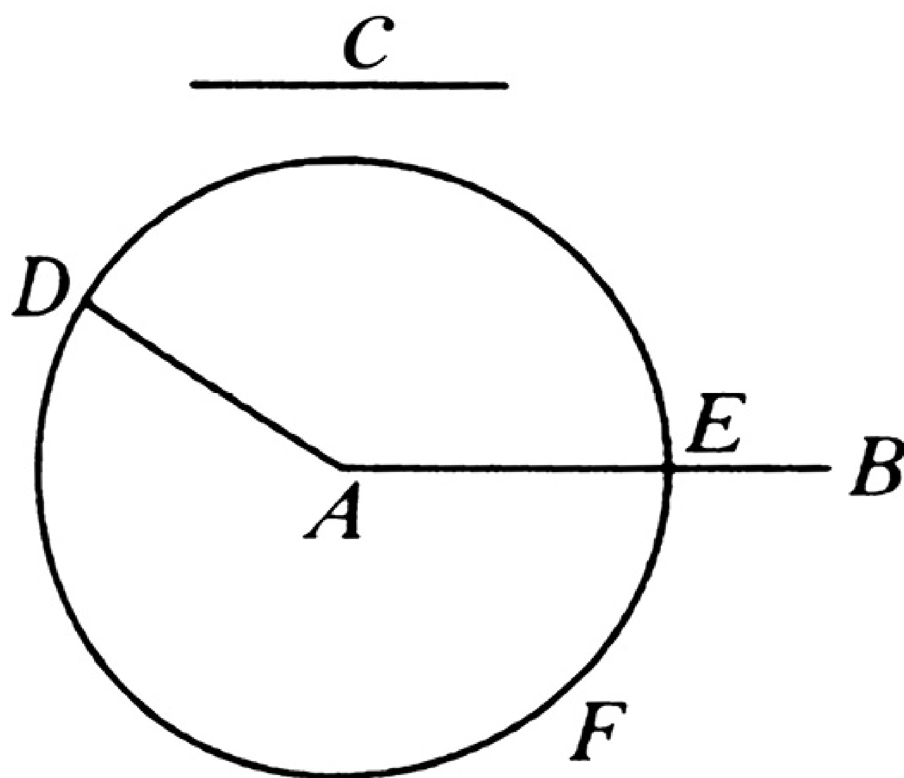
所以：从已知的点*A*作的线段*AL*等于已知线段*BC*。

这就是命题所要求作的。

命题3

…

已知两条不相等的线段，从较长的线段上边截取一条线段，让它等于另外一条线段。



设：AB、c是两条不相等的线段，并且AB大于c。

要求：从较长的线段AB上，截取一条线段，让它等于较短的线段c。

从点A截取AD，让它等于线段c，[I. 2]

将A作为圆心，以AD为半径画出圆DEF，[公设3]

因为：点A是圆DEF的圆心，因此AE等于AD，[定义15]

又因：c等于AD，因此线段AE、c都等于AD；由此推断出，AE等于c，[公理1]

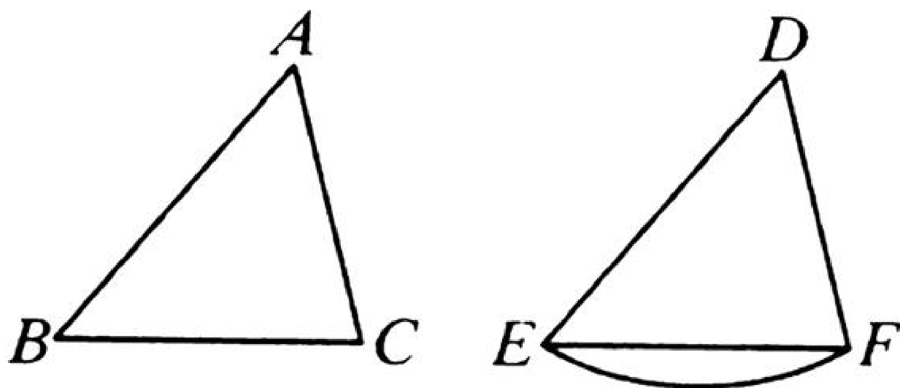
所以：给定两条线段AB、c，从较长的AB上截取AE，让它等于较短的线段c。

这就是命题所要求作的。

命题4

…

如果两个三角形的两边分别相等，并且相等的线段组成的夹角相等，就可以说这两个三角形的底边相等，三角形全等于三角形。因此，其余的两对应角亦相等。



设：ABC、DEF是两个三角形，AB等于DE，AC等于DF，并且角BAC等于角EDF。

因为：底边BC等于底边EF，三角形ABC全等于三角形DEF，剩下的角也分别相等，即角ABC等于角DEF，角ACB等于角DFE，

若将三角形ABC移动到三角形DEF上，如果点A落在点D上，并且线段AB落在DE上，已知AB等于DE，因此点B与点E重合，

又因：AB与DE重合，角BAC等于角EDF，因此线段AC也就与DF重合，

并且AC等于DF，因此点C也与点F重合，

又因：B也与E重合，所以底BC也与底EF重合，

假定：在B与E重合，并且C与F也重合时，底BC若是不和底EF重合，那么二条直线就围成了一块空间，但这是不可能的。因此底BC就与底EF重合并相等，[公理4]

所以：整个三角形ABC与整个三角形DEF重合，因此它们是全等的，

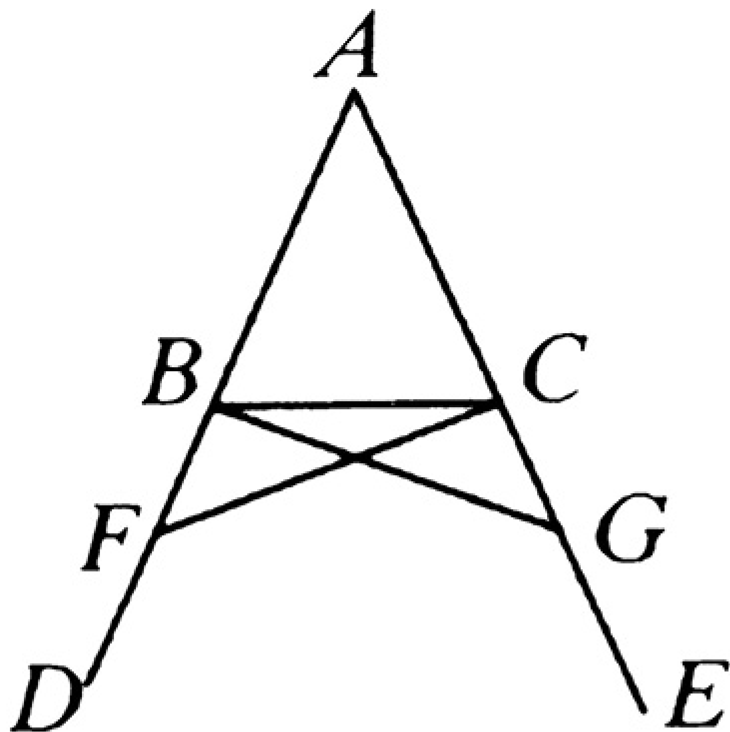
所以：其余的角也与其余的角重合，所以它们全都相等，也就是角ABC等于角DEF，并且角ACB等于角DFE。

这就是命题所要求证明的。

命题5

…

等腰三角形的两个底角相等，如果向下延长两个腰所在的直线，那么在底边形成的两个角亦相等。



设：ABC是一个等腰三角形，边AB等于边AC，延长AB、AC成直线BD、CE。[公设2]

求证：角ABC等于角ACB，并且角CBD等于角BCE。

如果从BD上任取一点F，又在较大的AE上截取线段AG，让它等于较小的AF。[I. 3]

连接FC和GB。[公设1]

因为：AF等于AG，且AB等于AC，两边FA、AC分别等于边GA、AB，并且它们包含着公共角FAG，

所以：底FC等于底GB，且三角形AFC全等于三角形AGB，

所以：剩下的角也分别相等，也就是相等的边所对的角，即角ACF等于角ABG，角AFC等于角AGB。[I. 4]

因为：整体AF等于整体AG，并且它们中的AB等于AC，因此余量BF

等于余量CG，[公理3]

又因：已经证明了FC等于GB，因此，边BF等于CG，边FC等于GB，而角BFC等于角CGB，

并且底BC是公用的，因此，三角形BFC也全等于三角形CGB；并且，剩下的角也分别相等，也就是等边所对的角，

因此：角FBC等于角GCB，并且角BCF等于角CBG。

因为：已经证明了角ABG等于角ACF，而角CBG等于角BCF，剩下的角ABC等于剩下的角ACB，[公理3]

而它们都在三角形ABC的底边以上，

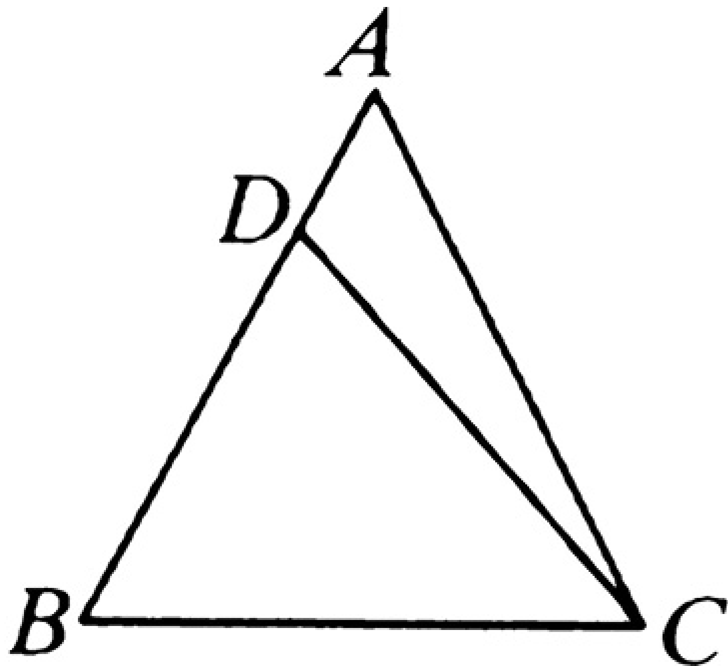
所以：角FBC等于角GCB，并且它们都在三角形的底边以下。

证完。

命题6

…

如果在一个三角形中，有两个角彼此相等，那么等角所对的边也彼此相等。



设：在三角形ABC中，角ABC等于角ACB。

求证：边AB等于边AC。

因为：若AB不等于AC，那么其中肯定有一个是比较大的边，假设AB是较大的边；从AB上截取DB等于较小的AC，[I. 3]

连接DC，

又因：DB等于AC，并且BC是公用边，边DB等于AC，BC等于CB，并且角DBC等于角ACB，

所以：底DC等于底AB，并且三角形DBC全等于三角形ACB，也就是小的等于大的：这并不合理，

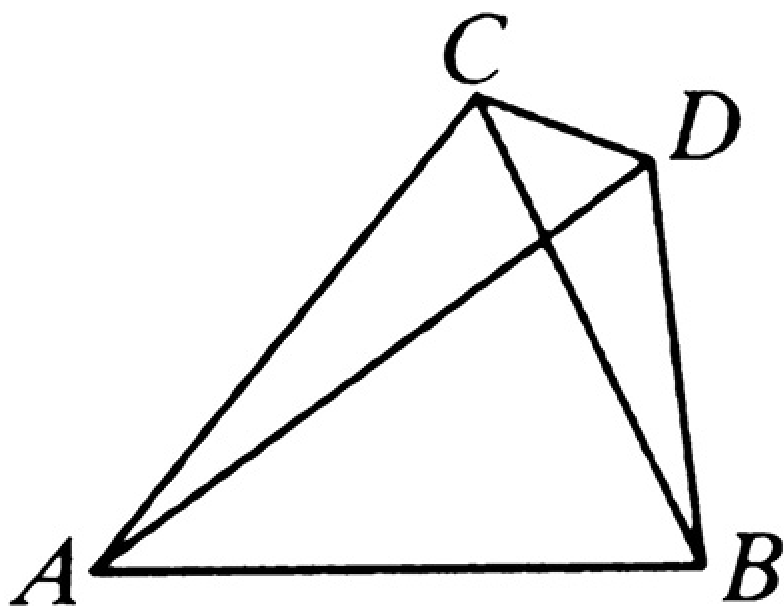
所以：AB必须等于AC。

证完。

命题7

…

过已知线段的两个端点，引出两条线段交于一点，那么不可能在这条线段（在它的两个端点）的同侧，有相交于另一点的另两条线段，分别等于前两条线段。即每个交点到相同端点的线段相等。



设：过*A*、*B*两点作交于点*C*的两条线段*AC*、*CB*。在同一侧，过*A*、*B*两点作另外两条线段*AD*、*DB*，相交于另外一点*D*。

因为：这二线段分别等于前面二线段，也就是每个交点到相同的端点，

因此：*CA*等于*DA*，它们都有共同的端点*A*，而*CB*等于*DB*，它们也都有共同的端点*B*，连接*CD*。

又因：*AC*等于*AD*，角*ACD*也就等于角*ADC*，[I. 5]

因此：角*ADC*大于角*DCB*，也就是角*CDB*比角*DCB*更大。

因为：*CB*等于*DB*，并且角*CDB*等于角*DCB*。可是上述已证明角*CDB*更大于角*DCB*，

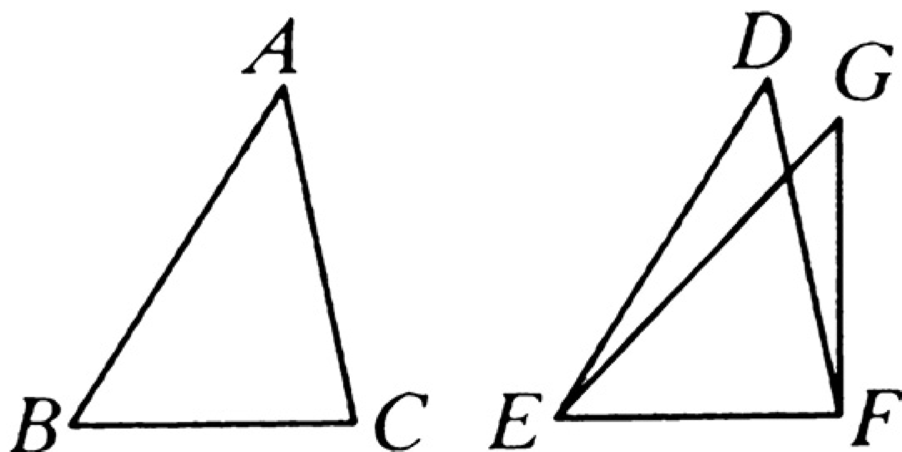
所以：这是不成立的。

证完。

命题8

…

如果两个三角形有两边分别相等，同时底也相等，那么这两个三角形的所有对应角亦相等。



设：三角形*ABC*和三角形*DEF*，两边*AB*、*AC*分别等于两边*DE*、*DF*，也就是*AB*等于*DE*，并且*AC*等于*DF*。

设：底*BC*等于底*EF*。

那么可以说：角*BAC*等于角*EDF*。

如果移动三角形*ABC*到三角形*DEF*，让点*B*落在点*E*上，线段*BC*在*EF*上，点*C*也就和点*F*重合。

因为：*BC*等于*EF*，

因此：*BC*和*EF*重合，*BA*、*AC*也和*ED*、*DF*重合。

又因：若底*BC*与底*EF*重合，并且边*BA*、*AC*不和*ED*、*DF*重合，而是

它们旁边的*EG*、*GF*处，

那么：在已知的线段（在它的端点）以上有相较于一点的给定两条线段。此时，在同一侧，从同一线段的两个端点，作交于另一个点的其余两条线段，它们分别等于前面二线段，也就是每一交点到同一端点的连线。

然而，不能作后二线段。[I. 7]

设：把底*BC*移动到底*EF*，边*BA*、*AC*和*ED*、*DF*不重合：以上并不成立，

因此：它们要重合，

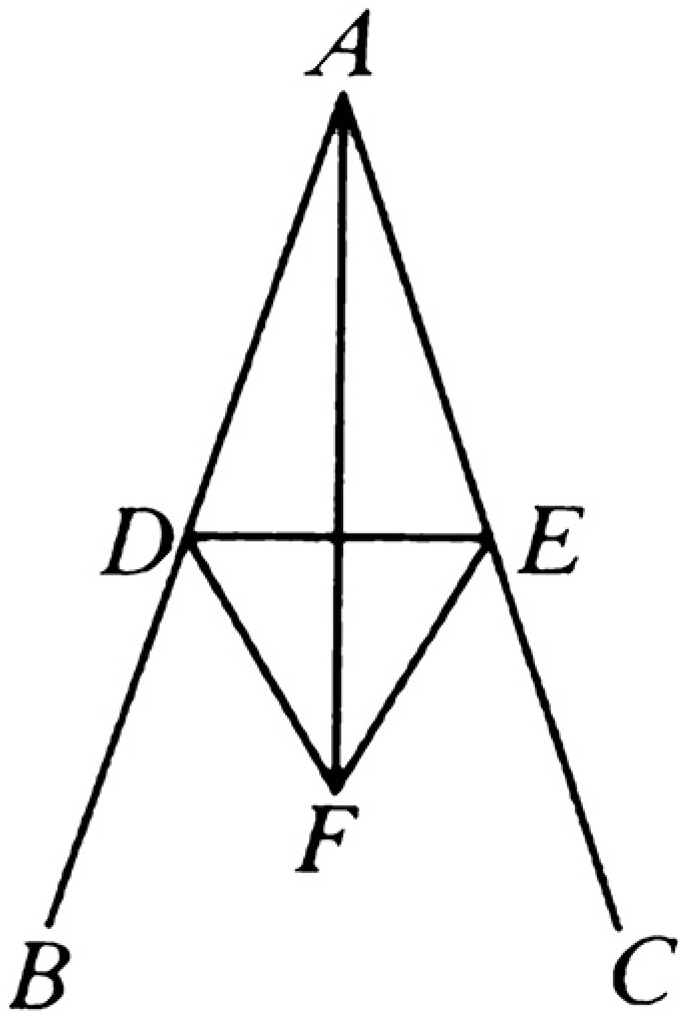
所以：角*BAC*也重合并等于角*EDF*。

证完。

命题9

…

将一个已知的直线角二等分。



设：已知角BAC是一个直线角，要求将其二等分。

假设在AB上任意选取一点D，在AC上截取AE，AE等于AD；[I. 3]

连接DE，并且在DE上作一个等边三角形DEF，连接AF。

所以：角BAC被AF二等分。

因为：AD等于AE，而AF是公用边，且底DF等于底EF；

因此：角DAF等于角EAF。[I. 8]

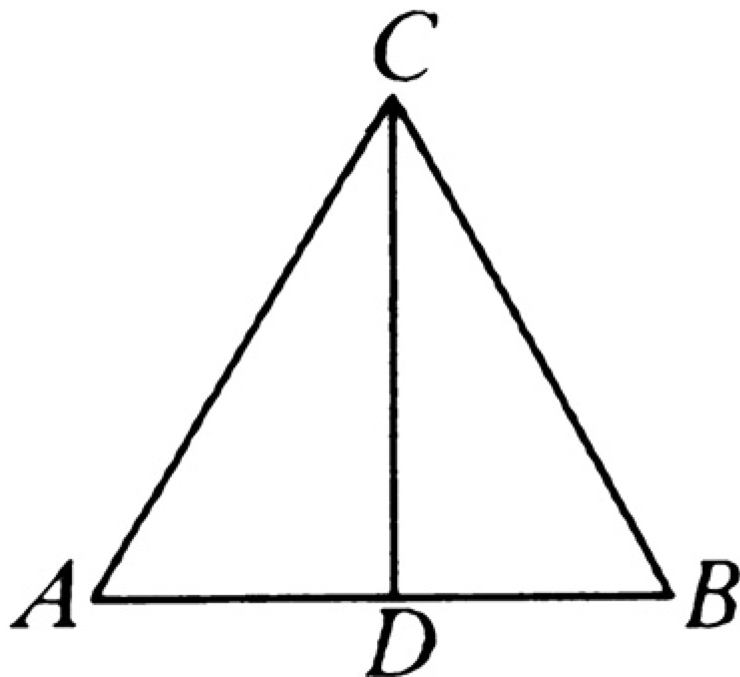
所以：直线AF二等分给定直线角BAC。

证完。

命题10

…

将一条线段二等分。



设：*AB*是给定有限直线，要求二等分有限直线*AB*。

假设在*AB*上作一个等边三角形*ABC*。[I. 1]

并且设直线*CD*二等分角*ACB*。[I. 9]

可以说，线段*AB*在点*D*被二等分。

因为：*AC*等于*BC*，而*CD*为公用边，角*ACD*等于角*BCD*。

因此：底*AD*等于底*BD*。[I. 4]

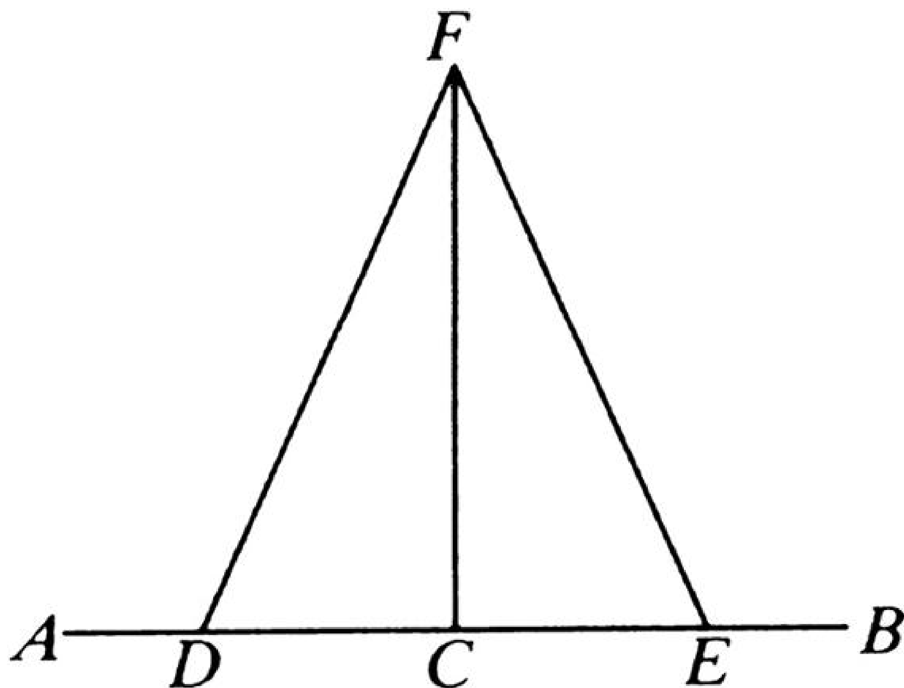
所以：将已知有限直线*AB*二等分于点*D*。

证完。

命题11

…

过已知直线上的一个点，可以作该直线的垂直线。



设：*AB*是已知的直线，*C*是直线上的已知点。

要求由点*C*作一条直线和直线*AB*成直角。

在*AC*上任意截取一个点*D*，并且使*CE*等于*CD*，[I. 3]。

从*DE*上作一个等边三角形*FDE*

[I. 1]，连接*FC*。

因此：直线*FC*就是在已知直线*AB*上的点*C*作的垂直线。

因为：*DC*等于*CE*，而*CF*为公用边，并且底*DF*等于底*FE*，

因此：角*DCF*等于角*ECF*。[I. 8]

又因：角*DCF*与角*ECF*是邻角，

当一条直线和另一个直线相交成相等的邻角时，这些等角都是直角，[定义10]

所以：角*DCF*、*FCE*都是直角，

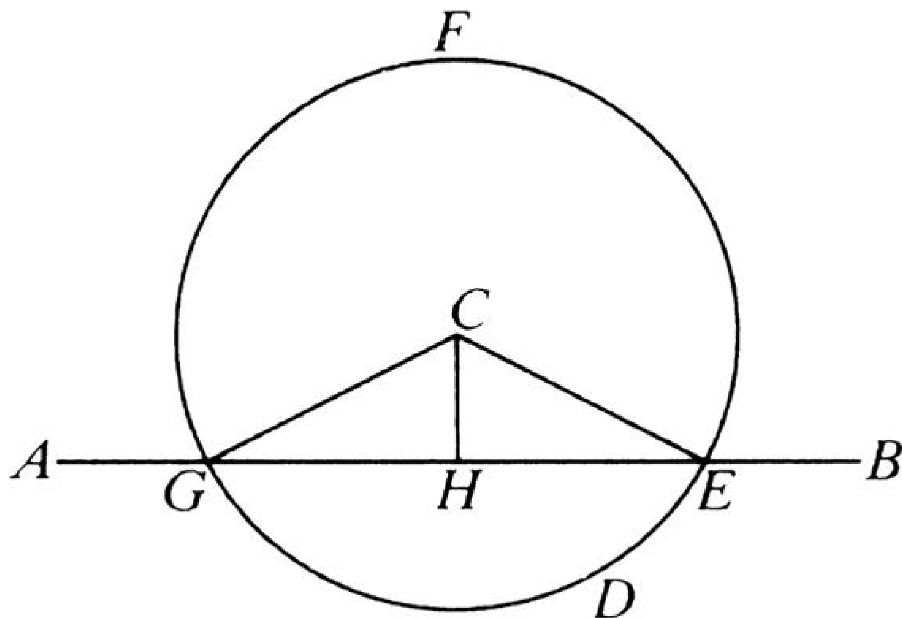
所以：从已知的直线*AB*上的给定点*C*作的直线*CF*和*AB*成直角。

证完。

命题12

…

从已知的无限直线外的一已知点作该直线的垂线。



设：*AB*为已知的无限直线，并且假设给定点*C*不在直线上。

要求：从点C作无限直线AB的垂线。

令：在直线AB的另一侧任意取一个点D，并且以点C为圆心，以CD为半径作圆EFG。[公设3]

假设线段EG被点H二等分。[I. 10]

连接CG、CH、CE。[公设1]

因为：GH等于HE，HC为公用边，并且底CG等于CE。

因此：角CHG等于角EHC。

又因：角CHG与角EHC是邻角，[I. 8]

在两条直线相交成相等的邻角时，每一个角都是直角，就称一条直线垂直于另一条直线。[定义10]

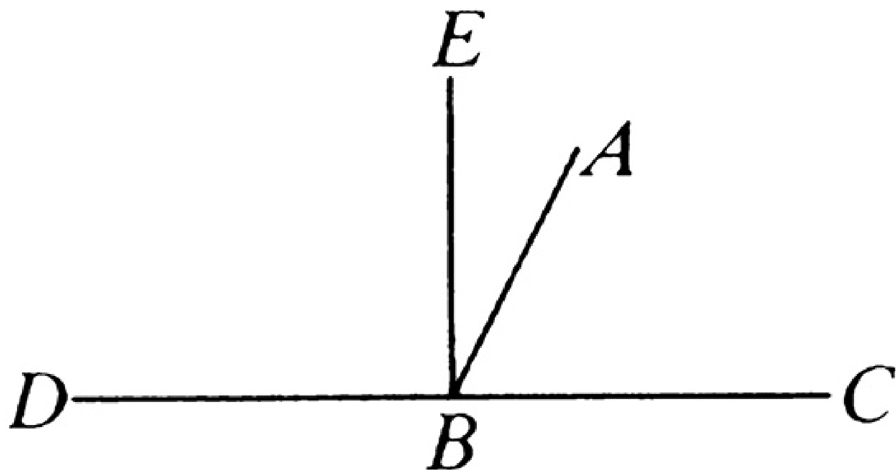
所以：从不在所给定的无限直线AB外的给定点C作的CH垂直于AB。

证完。

命题13

…

两条直线相交，邻角或是两个直角，或是它们的和等于两个直角（**180°**）。



设：在直线*CD*上的任意一条直线*AB*，交成角*CBA*与角*ABD*，要么是两个直角，要么它们的和互补（180°）。

如果：角*CBA*等于角*ABD*，则可以推断出它们是两个直角，[定义10]

若不是，假设*BE*是在点*B*所作的和*CD*成直角的直线，[I. 11]

因此：角*CBE*和角*EBD*是两个直角。

因为：角*CBE*等于角*CBA*与角*ABE*的和，那么将它们都加上角*EBD*；可以得出角*CBE*、*EBD*的和就等于角*CBA*、*ABE*、*EBD*的和，[公理2]

又因：角*DBE*加上角*EBA*等于角*DBA*，那么角*DBA*加上角*ABC*等于角*DBE*加上角*EBA*再加上角*ABC*，等于两个直角（180°），[公理2]

那么：角*CBE*与角*EBD*的和（180°）也就证明了等于相同的三个角（60°）的和。

因为：等于同量的量彼此相等，[公理1]

所以：角*CBE*、角*EBD*的和就等于角*DBA*、角*ABC*的和。

因为：角*CBE*、*EBD*的和是两个直角，

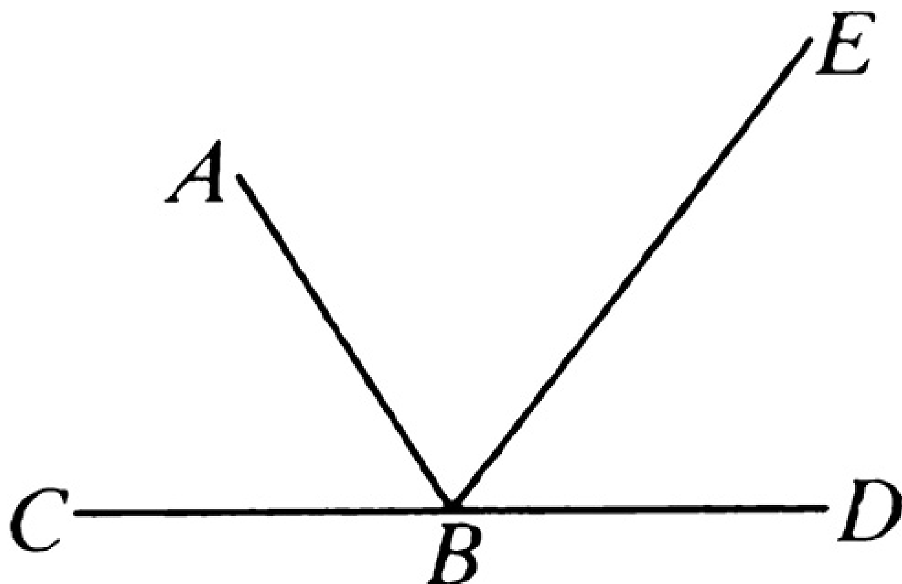
所以：角*DBA*、*ABC*的和等于两个直角。

证完。

命题14

…

如果两条不在同一边的直线过任意直线上的一点，且所构成的邻角等于两个直角的和（平角），那么这两条直线构成一条直线。



设：*AB*为任意直线，*B*是端点。直线*BC*、*BD*与*AB*不在同侧，邻角*ABC*、*ABD*的和等于两个直角（180°）。

那么：*BD*和*CB*在同一直线上。

假设：*BD*和*BC*不在同一直线上，*BE*和*CB*在同一直线上。

因为：直线*AB*位于直线*CBE*上面，角*ABC*、角*ABE*的和等于两个直角，而角*ABC*、*ABD*的和等于两个直角，[I. 13]

因此：角*CBA*、角*ABE*的和等于角*CBA*、角 *ABD*的和。

[公设4和公理1]

如果：从它们中各减去角*CBA*，就让剩下的角*ABE*等于剩下的角*ABD*，[公理3]

此时，小角等于大角：不符合常理，

所以：假设无法成立，*BE*和*CB*不在一条直线上。

同理可证：除*BD*外，再没有其他的直线和*CB*在同一直线上，

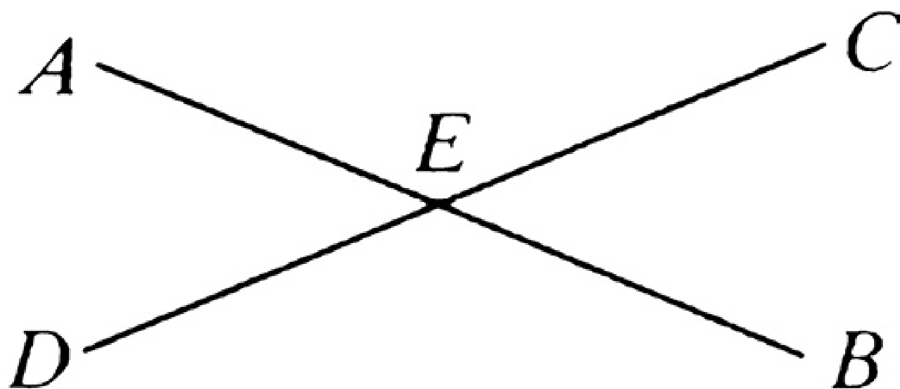
所以：*CB*和*BD*在同一直线上。

证完。

命题15

…

若两条直线相交，那么交成的对顶角相等。



设：直线*AB*、*CD*相交于点*E*。

那么：*AEC*等于角*DEB*，并且角*CEB*等于角*AED*。

因为：直线*AE*位于直线*CD*上方，所构成的角*CEA*、*AED*，两个角的和等于两个直角，

又因：直线*CE*位于直线*AB*的上方，所组成的角*AED*、*DEB*的和等于两个直角，[I. 13]

并且之前证明了角CEA、AED的和等于两个直角，

所以：角CEA、AED的和等于角AED、DEB的和，[公设4和公理1]

从它们中各自减去角AED，那么剩下的角CEA等于剩下的角BED。[公理3]

同理可证：角CEB等于角DEA。

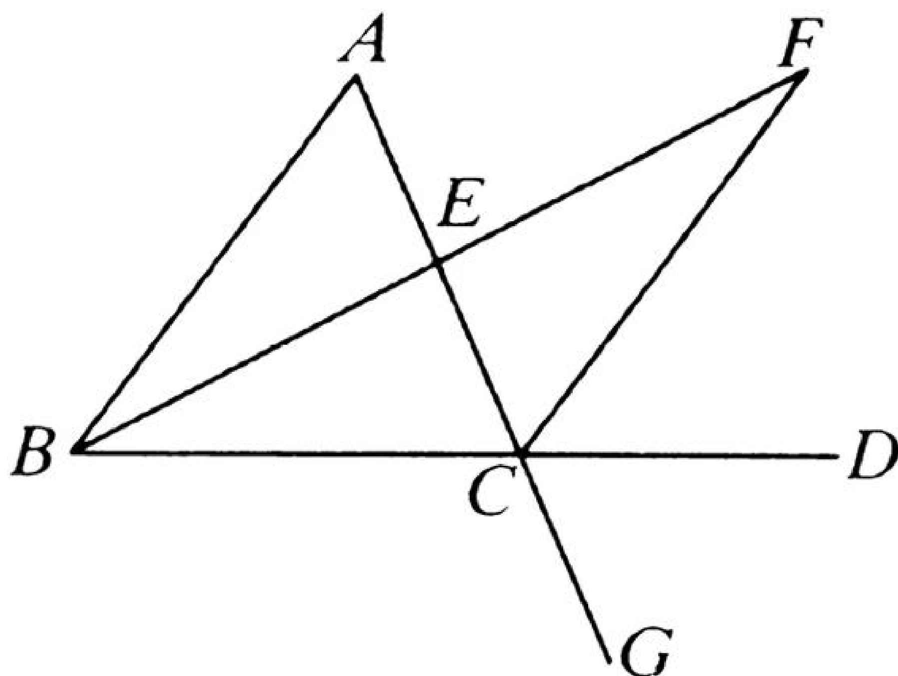
证完。

推论 很明显，如果两条直线相交，那么在交点处所构成的角的和等于四个直角的和（360°）。

命题16

…

在任意三角形中，将一边延长，那么外角大于任意一个不相邻的内角。



设：ABC是一个三角形，延长边BC到点D。

那么：外角ACD大于内角CBA或角BAC。

线段AC被点E二等分，[I. 10]

连接BE并延长至点F，让EF等于BE，[I. 3]

连接FC，[公设1]

延长AC至G。[公设2]

因为：AE等于EC，BE等于EF，两边AE、EB分别等于两边CE、EF，

又因：角AEB和角FEC是对相等顶角，[I. 15]

所以：底AB等于底FC，并且三角形ABE全等于三角形CFE，剩下等边所对的角也都分别相等，[I. 4]

角BAE等于角ECF。

又因：角ECD大于角ECF，[公理5]

所以：角ACD大于角BAE。

同理可证：如果BC被平分，那么角BCG，或是角ACD，[I. 15]

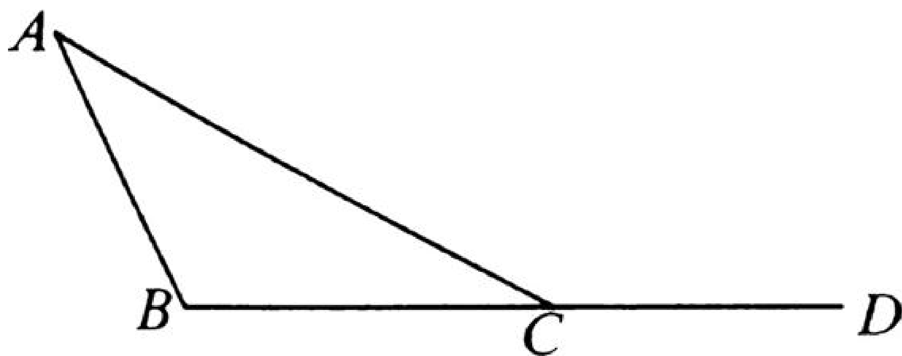
大于角ABC。

证完。

命题17

…

在任意一个三角形中，两内角之和小于两个直角（**180°**）。



设：*ABC*是一个三角形。

那么：三角形*ABC*的任意两个角的和都小于两个直角。

将*BC*延长至点*D*。[公设2]

因为：角*ACD*是三角形*ABC*的外角，因此，它大于内对角*ABC*。

将角*ACB*与其他角相加，

那么：角*ACD*、*ACB*的和，大于角*ABC*、*BCA*的和。

因为：角*ACD*、*ACB*的和等于两个直角，[I. 13]

所以：角*ABC*、*BCA*的和小于二直角。

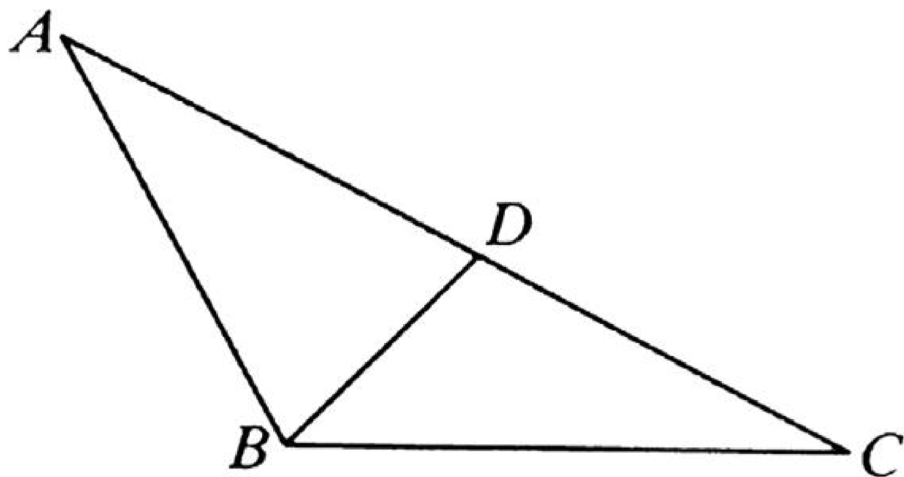
同理可证：角*BAC*、角*ACB*的和小于两个直角；角*CAB*、角*ABC*的和小于两个直角。

证完。

命题18

…

在任意一个三角形中，大边一定对大角。



设：在三角形*ABC*中，边*AC*大于边*AB*。

则可证：角*ABC*大于角*BCA*。

因为：*AC*大于*AB*，截取*AD*等于*AB*，[I. 3]

连接*BD*。

因为：角*ADB*是三角形*BCD*的外角，大于内对角*DCB*，[I. 16]

又因：边*AB*等于边*AD*，

所以：角*ADB*等于角*ABD*，

所以：角*ABD*大于角*ACB*，

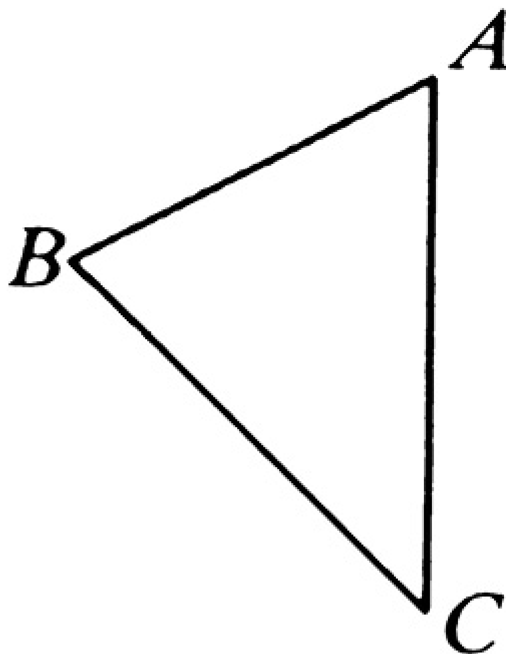
因此：角*ABC*大于角*ACB*。

证完。

命题19

…

在任意一个三角形中，大角一定对大边。



设：在三角形ABC中，角ABC大于角BCA。

则可证：边AC大于边AB。

若假设不是，那么边AC等于或者小于AB。

现假设AC等于AB，那么角ABC也会等于角ACB。[I. 5]

但事实上是不相等的。

因此：AC不等于AB。

同理，AC也不能小于AB，因为这样，角ABC也会小于角ACB。[I. 18]

但事实并非如此，因此：AC不小于AB。

又因：已经证明了AC不能等于AB，

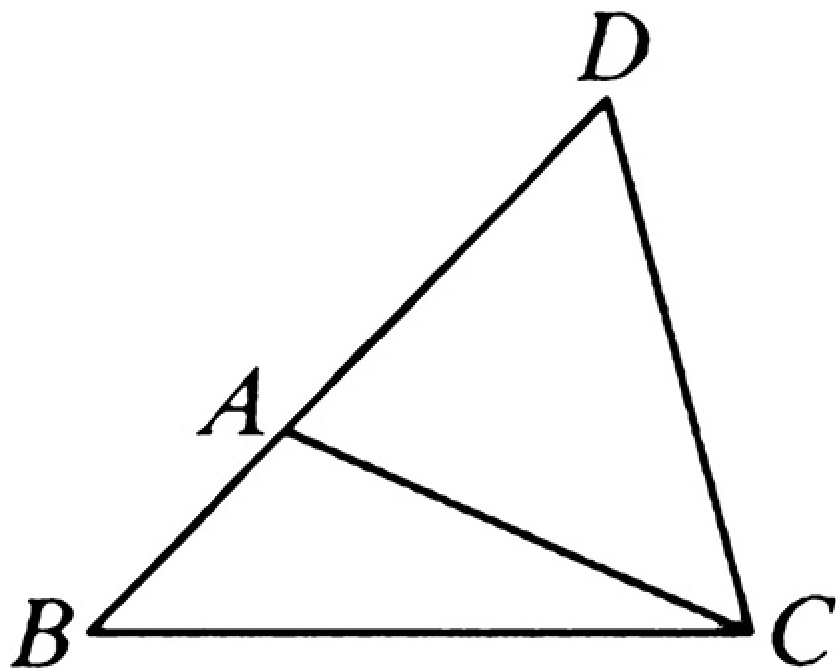
所以：AC大于AB。

证完。

命题20

…

在任何三角形中，任意两边之和大于第三边。



设：*ABC*是三角形。

则可证：在三角形*ABC*中，任意两边之和大于第三边。

也就是：*BA*、*AC*之和大于*BC*；*AB*、*BC*之和大于*AC*；*BC*、*CA*之和大于*AB*。

那么：延长*BA*至点*D*，让*DA*等于*CA*，连接*DC*。

因为：*DA*等于*AC*，角*ADC*等于角*ACD*，[I. 5]

所以，角*BCD*大于角*ADC*。[公理5]

又因：在三角形*DCB*中，因为大角对大边，而角*BCD*大于角*BDC*，[I. 19]

所以：DB大于BC，

并且DA等于AC，

所以：BA、AC的和大于BC。

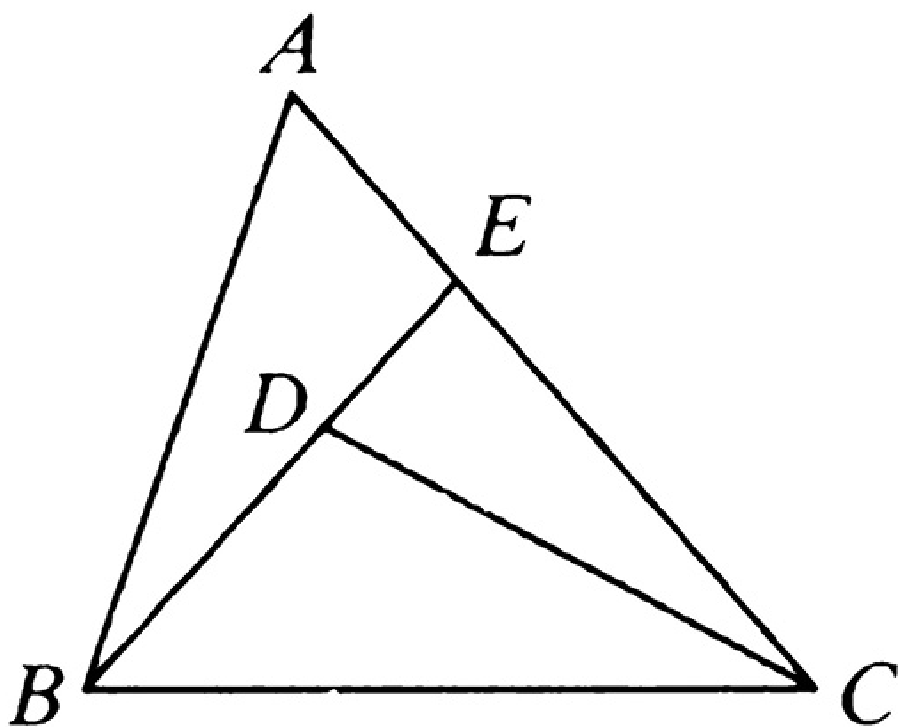
同理可证：AB、BC的和大于CA；BC、CA的和大于AB。

证完。

命题21

…

如果从三角形的一边的两个端点，向三角形内部引两条相交的线段，那么从交点到两端点的线段和，小于三角形其余两边的和，其夹角大于三角形的顶角。



设：在三角形ABC的一条边BC上，从端点B、端点C作两条线段

BD、*DC*，相交于三角形内部。

则可证：*BD*与*DC*的和，小于三角形的其余两边*BA*与*AC*的和，所夹的角*BDC*大于角*BAC*。

令：延长*BD*和*AC*交于点*E*。

因为：在三角形中任意两边之和大于第三边，[I. 20]

所以：在三角形*ABE*中，边*AB*与*AE*的和大于*BE*。

将*EC*加到以上各边，那么*BA*与*AC*的和大于*BE*与*EC*的和。

因为：在三角形*CED*中，*CE*与*ED*两边的和大于*CD*，

将它们分别与*DB*相加，

那么：*CE*与*EB*的和大于*CD*与*DB*的和。

因为：已证明*BA*与*AC*的和大于*BE*与*EC*的和，

所以：*BA*与*AC*的和大于*BD*与*DC*的和。

又因：在任何三角形中，外角大于内对角，[I. 16]

所以：在三角形*CDE*中，外角*BDC*大于角*CED*。

同理可证：在三角形*ABE*中，外角*CEB*大于角*BAC*。而角*BDC*大于角*CEB*，

所以：角*BDC*比角*BAC*更大。

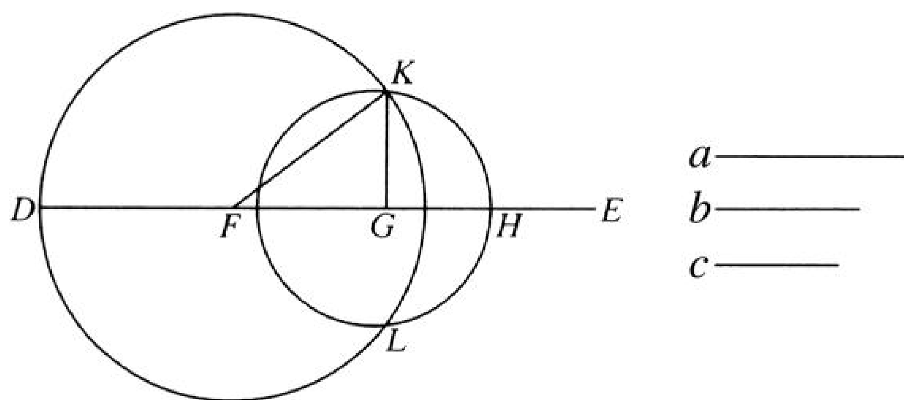
证完。

命题22

…

用等于已知三条线段的三条线段建立三角形，那么这三条线段中的任意

两条线段的和，必须大于另外一条线段。



设：已知的三条线段是a、b、c。它们中任何两条之和大于另外一条。即a与b的和大于c；a与c的和大于b；b与c的和大于a。

则可用等于a、b、c的三条线段，作一个三角形。

假设另外有一条直线DE，一端为D，另一端向E的方向无限延长，

令：DE等于a，FG等于b，GH等于b。[I. 3]

以F为圆心，FD为半径，画圆DKL；以G为圆心，GH为半径，画圆KLH。

圆KLH与圆KLD相交于K，并连接KF、KG。

可以说：三角形KFG是由等于a、b、c的三条线段所做成的三角形。

因为：点F是DKL的圆心，因此FD等于FK，

并且FD等于a，所以KF等于a。

又因：点G是圆LKH的圆心，因此GH等于GK，

所以：GH等于c，

所以：KG等于c，且FG等于b，

所以：三条线段KF、FG、GK等于已知的线段a、b、c，

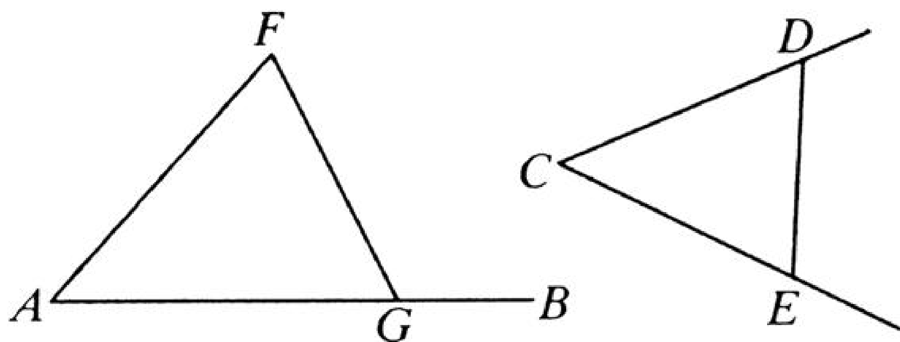
因此：用分别等于已知线段a、b、c的三条线段KF、FG、GK作了三角形KFG。

证完。

命题23

…

已知直线和它上面的一点，作一个直线角等于已知直线角。



设：AB是已知直线，A是其上面的一个点，角DCE是已知的直线角。

则可从已知直线AB上选取的已知点A，作一个角等于给定直线角DCE。

令：在直线CD、CE上分别任意取点D、E，连接DE。

用等于CD、DE、CE的三条线段作三角形AFG，让CD等于AF，CE等于AG，DE等于FG。[I. 22]

因为：CD等于AF，CE等于AG，且底DE等于底FG；角DCE等于角FAG，[I. 8]

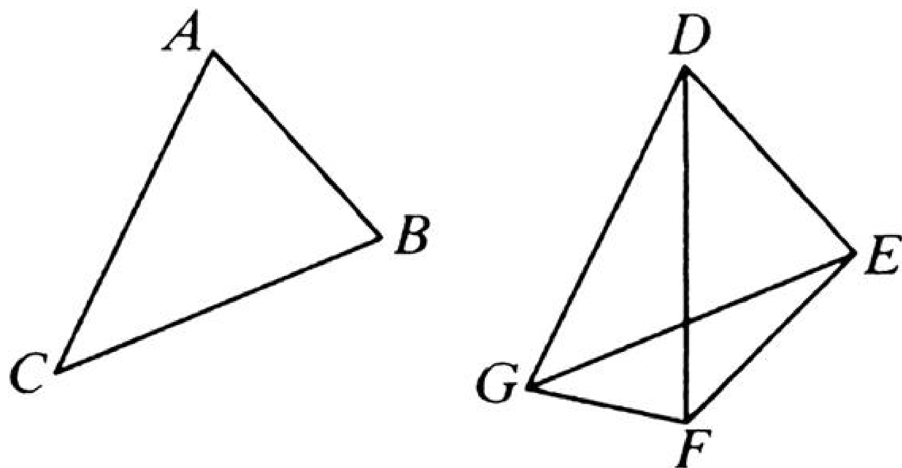
所以：在已知的直线AB和它上面已知点A作了直线角FAG，并等于已知直线角DCE。

证完。

命题24

…

假设在两个三角形中，有两条边分别相等，并且一个三角形的夹角大于另一个三角形的夹角，那么夹角大的所对的边也较大。



设：*ABC*、*DEF*是两个三角形，边*AB*与*AC*分别等于边*DE*与*DF*，也就是*AB*等于*DE*，*AC*等于*DF*，并且在*A*的角大于在*D*的角。

可以说：底*BC*大于底*EF*。

因为：角*BAC*大于角*EDF*，在线段*DE*的点*D*作角*EDG*，等于角*BAC*，[I. 23]

令：截取*DG*等于*AC*，并且等于*DF*，连接*EG*、*FG*，

那么：*AB*等于*DE*，*AC*等于*DG*，两边*BA*等于*ED*，*AC*等于*DG*，

并且角*BAC*等于角*EDG*，因此底*BC*等于底*EG*。[I. 4]

由于*DF*等于*DG*，角*DGF*等于角*DFG*，[I. 5]

所以：角*DFG*大于角*EGF*，

因此：角*EFG*大于角*EGF*。

因为：*EFG*是一个三角形，角*EFG*大于角*EGF*，并且较大角所对的边较大，[I. 19]

边*EG*大于*EF*，但*EG*等于*BC*，

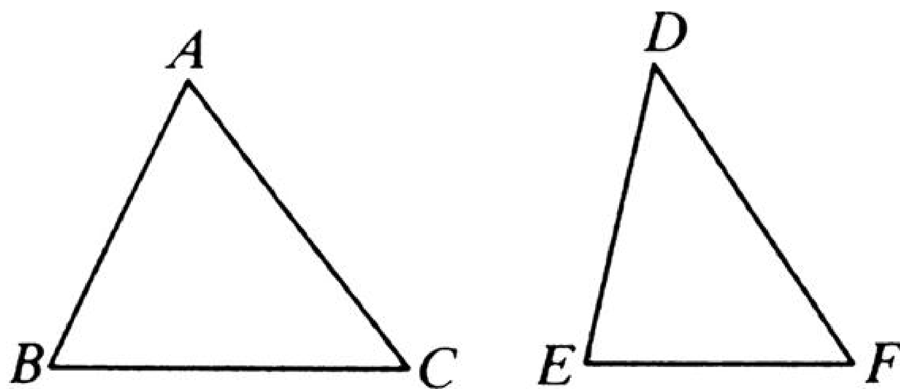
所以：*BC*大于*EF*。

证完。

命题25

…

假如在两个三角形中，有两条边分别对应相等，其中一个三角形的第三边比另一个大，那么第三边较大的所对的角也较大。



设：*ABC*、*DEF*是两个三角形，其中两边*AB*、*AC*分别等于两边*DE*、*DF*，即*AB*等于*DE*，*AC*等于*DF*；并且设底*BC*大于底*EF*。

那么，可以说：角*BAC*大于角*EDF*。

若非如此，则角*BAC*小于或等于角*EDF*，

现在，先设角*BAC*不等于角*EDF*，否则底*BC*就会等于底*EF*，这与已

知相矛盾，[I. 4]

所以：角*BAC*不等于角*EDF*。

又设角*BAC*不小于角*EDF*，那么底*BC*就会小于底*EF*，[I. 24]

但事实并非如此，

所以：角*BAC*不小于角*EDF*。

由于已证三角不相等，

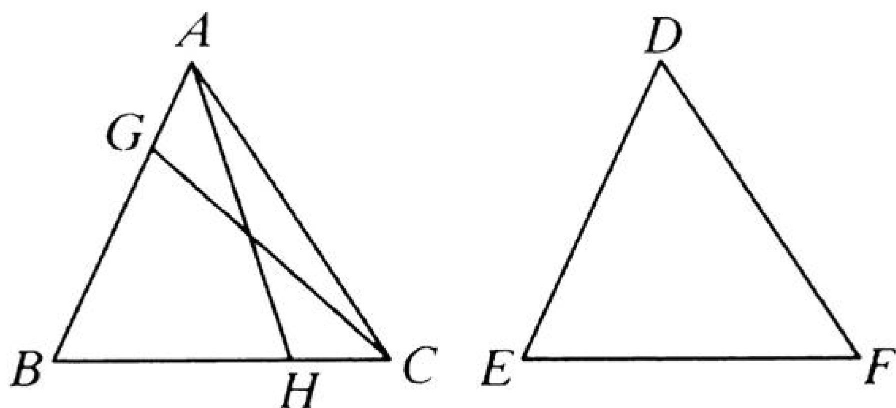
所以：角*BAC*大于角*EDF*。

证完。

命题26

…

如果在两个三角形中，有两对角分别相等，并且有一条边相等，如果这条边是等角的夹边，又或是等角的对边，那么它们其他的边也相等，并且角也相等。



设：在三角形*ABC*、*DEF*中，有两角分别相等，

即角*ABC*等于角*DEF*，角*BCA*等于角*EFD*。

又设：有一边等于另一边，可以先设它们是等角所夹的边，也就是*BC*等于*EF*，

那么可以说：其余的边也分别相等，也就是*AB*等于*DE*，*AC*等于*DF*，

同样，其余的角也分别相等，即角*BAC*等于角*EDF*。

因为：如果*AB*不等于*DE*，那么其中有一条边较大，

设：*AB*是较大的，截取*BG*等于*DE*，连接*GC*。

因为：*BG*等于*DE*，*BC*等于*EF*，

所以：两边*GB*、*BC*分别等于*DE*、*EF*。

又因：角*GBC*等于角*DEF*，

所以：底*GC*等于底*DF*。

因为：三角形*GBC*全等于三角形*DEF*，其余的角也分别相等，即等边相对的角对应相等，[I. 4]

所以：角*GCB*等于角*DFE*。

但是根据假设，角*DFE*等于角*BCA*，

所以：角*BCG*等于角*BCA*，

就是小的等于大的，这是不可能的，

因此：*AB*不能不等于底*DE*，从而得出*AB*等于*DE*。

但是，*BC*等于*EF*，

所以：两边分别相等，即*AB*等于*DE*，*BC*等于*EF*，并且角*ABC*等于角*DEF*，

因此：底*AC*等于底*DF*，剩下的角*BAC*等于角*EDF*。[I. 4]

又设：等角的对边相等，比如*AB*等于*DE*，

那么可以说：其余的边分别相等，也就是*AC*等于*DF*，*BC*等于*EF*，角*BAC*等于角*EDF*。

假如*BC*不等于*EF*，其中有一个较大，

又设：*BC*是较大的，且*BH*等于*EF*，连接*AH*，

那么：由于*BH*等于*EF*，*AB*等于*DE*，

所以：有两边分别相等，即*AB*等于*DE*，*BH*等于*EF*，且它们的夹角相等，

所以：底*AH*等于底*DF*，三角形*ABH*全等于三角形*DEF*，

其余的角也互相相等，也就是等边所对的角相等，[I. 4]

所以：角*BHA*等于角*EFD*。

但是角*EFD*等于角*BCA*，

所以：在三角形*AHC*中，外角*BHA*等于内对角*BCA*；这是不可能的，[I. 16]

因此：*BC*不能不等于*EF*，必须要等于。

但是，*AB*等于*DE*，因此两边*AB*、*BC*分别等于两边*DE*、*EF*，它们所夹的角也相等，

所以：底*AC*等于底*DF*，

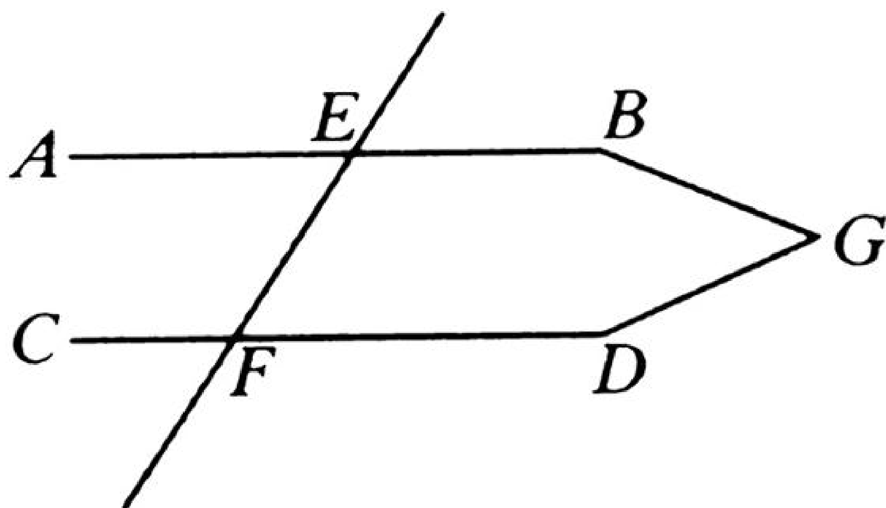
三角形*ABC*等于三角形*DEF*，并且其余的角*BAC*等于其余的角*EDF*。[I. 4]

证完。

命题27

…

假如一条直线和两条直线相交所成的错角彼此相等，那么这两条直线互相平行。



设：直线*EF*和两条直线*AB*、*CD*相交所成的错角*AEF*与*EFD*彼此相等。

那么可以说：*AB*平行于*CD*。

事实上，如果两条直线不平行，在延长*AB*、*CD*时，它们要么在*B*、*D*方向，要么在*A*、*C*方向相交，假设它们在*B*、*D*方向相交于*G*，

所以：在三角形*GEF*中，外角*AEF*等于内对角*EFG*：这是不可能的，[I. 16]

因此：*AB*、*CD*经过延长后在*B*、*D*方向不相交。

同理可证：它们在*A*、*C*方向也无法相交。

如果两条直线不在任何一方相交，那么就相互平行。[定义23]

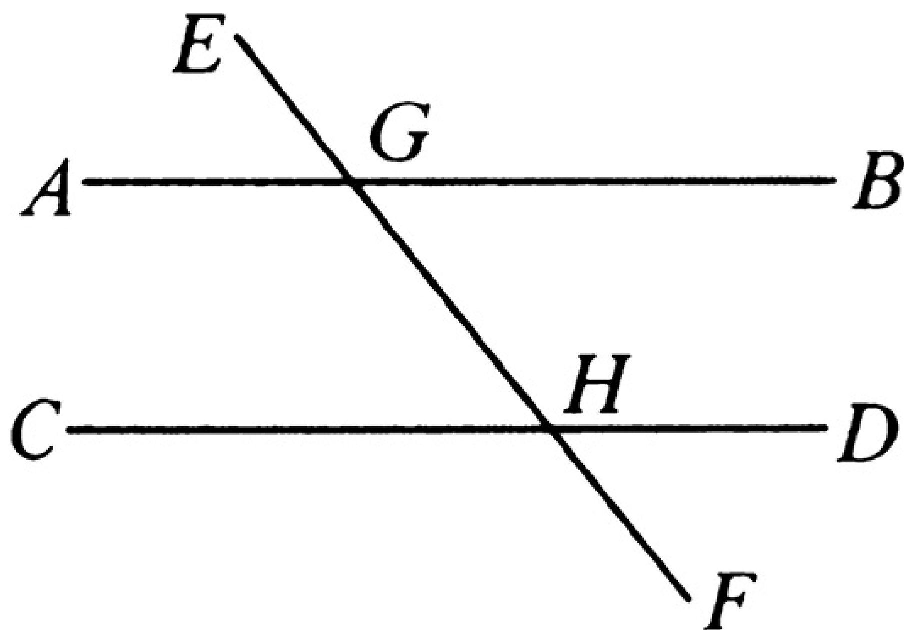
所以：*AB*平行于*CD*。

证完。

命题28

…

假如一条直线和两条直线相交所成的相同位置的角相等，又或者和旁内角的和等于两直角，那么这两条直线相互平行。



设：直线*EF*和两条直线*AB*、*CD*相交所成的同位角*EGB*和*GHD*相等，又或者同旁内角，即*BGH*与*GHD*的和等于两直角。

那么可以说：*AB*平行于*CD*。

因为：角*EGB*等于角*GHD*，角*EGB*等于角*AGH*，[I. 15]

又因：角*AGH*等于角*GHD*，并且它们是错角，

因此：*AB*平行于*CD*。[I. 27]

因为：角*BGH*、*GHD*的和等于两直角，并且角*AGH*、*BGH*的和等于两直角，[I. 13]

角*AGH*、*BGH*的和等于角*BGH*、*GHD*的和。在前面两边各减去角*BGH*，那么剩下的角*AGH*等于剩下的角*GHD*，并且它们是错角，

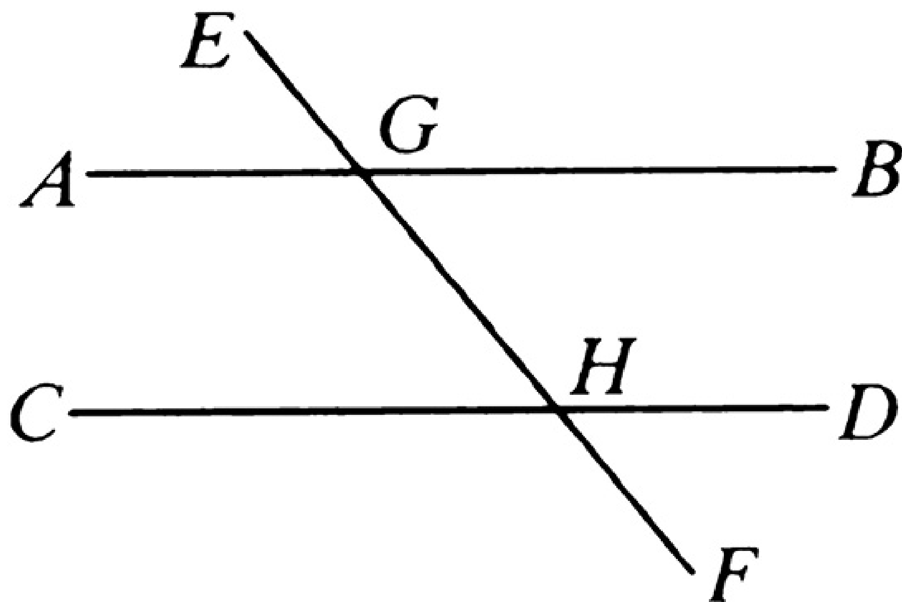
所以：*AB*平行于*CD*。[I. 27]

证完。

命题29

…

一条直线与两条平行线相交，则所成的内错角相等，同位角相等，且同旁内角的和等于两直角。



设：直线*EF*与两条平行线*AB*、*CD*相交。

那么可以说：错角*AGH*、*GHD*相等；同位角*EGB*、*GHD*相等；同旁内角*BGH*、*GHD*的和等于两直角。

因为：如果角*AGH*不等于角*GHD*，假设其中一个比较大，较大的角是*AGH*。在这两个角都加上角*BGH*，那么角*AGH*、*BGH*的和大于角

BGH、GHD的和，

又因：角AGH、BGH的和等于两直角，[I. 13]

所以：角BGH、GHD的和小于两直角，

将两直线无限延长，在二角的和小于两直角这侧相交。[公设5]

所以：如果无限延长AB、CD则必定会相交，但是它们并不相交。由于，假设它们是平行的。因此角AGH不能不等于角GHD，它们必须相等。

又因：角AGH等于角EGB，[I. 15]

所以：角EGB等于角GHD，[公理1]

在上面两边各加角BGH，那么角EGB、BGH的和等于角BGH、GHD的和。[公理2]

又因：角EGB、BGH的和等于两直角，[I. 13]

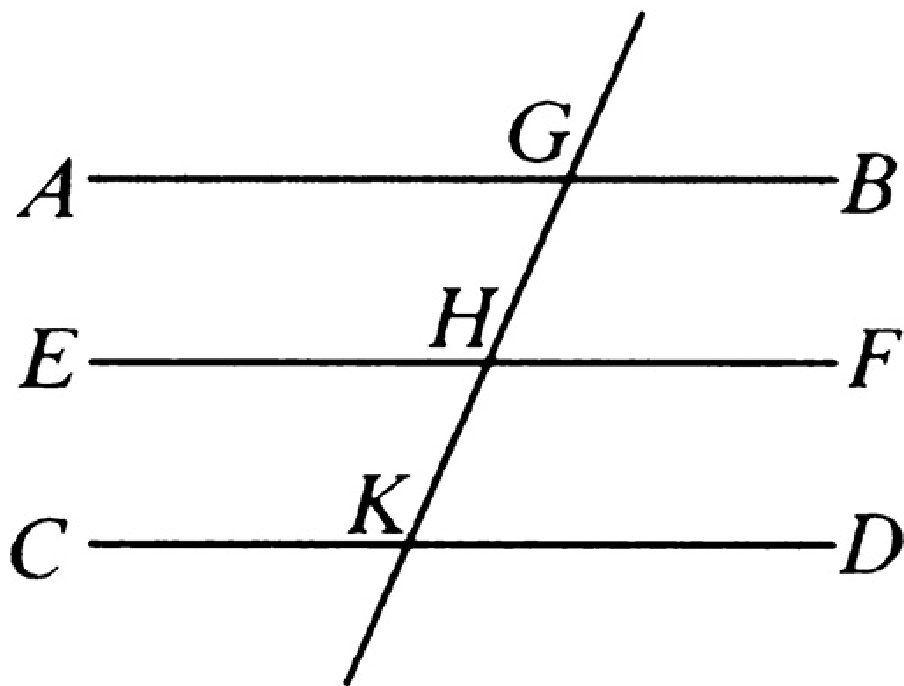
所以：角BGH、GHD的和等于两直角。

证完。

命题30

…

平行于同一条直线的两条直线，相互平行。



设：直线*AB*、*CD*的每一条线都平行于*EF*。

那么可以说：*AB*也平行于*CD*。

可设：直线*GK*与这三条直线相交，此时，由于直线*GK*和平行直线*AB*、*EF*都相交，角*AGK*等于角*GHF*。[I. 29]

因为：直线*GK*和平行直线*EF*、*CD*相交，角*GHF*等于角*GKD*，[I. 29]

又因：已证角*AGK*等于角*GHF*，

因此：角*AGK*等于角*GKD*；[公理1]

且它们都是错角，

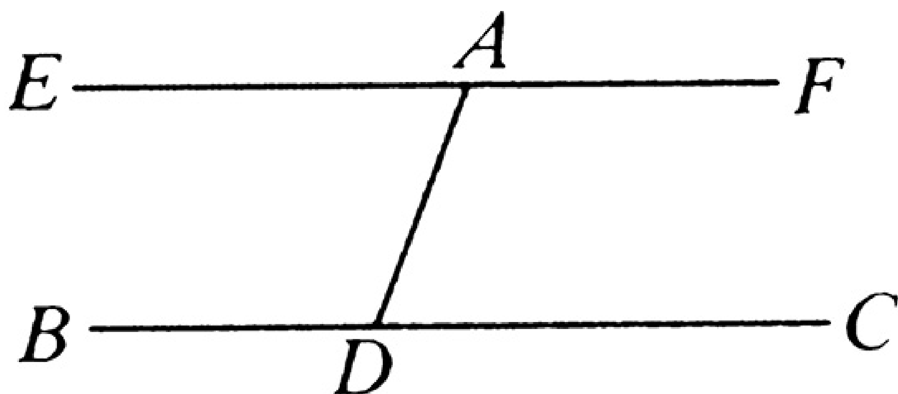
所以：*AB*平行于*CD*。

证完。

命题31

…

过一个给定点作一条直线平行于给定直线。



设：给定点*A*，给定直线*BC*。要求经过点*A*作一条直线平行于直线*BC*。

从*BC*上任意取一点*D*，连接*AD*；在直线*DA*上的点*A*，作角*DAE*等于角*ADC*。[I. 23]

假设直线*AF*是直线*EA*的延长线。

因为：直线*AD*和两条直线*BC*、*EF*相交成彼此相等的错角*EAD*、*ADC*，

所以：*EAF*平行于*BC*，[I. 27]

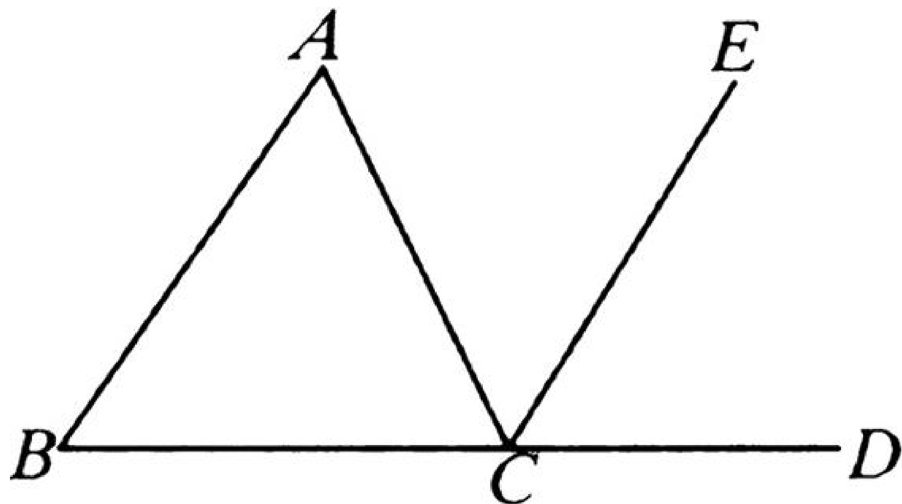
所以：经过已知点*A*作了一条平行于已知直线*BC*的直线*EAF*。

作完。

命题32

…

在任意三角形中，如果延长一边，则形成的外角等于两个内对角的和，并且三角形的三个内角和等于两直角。



设：*ABC*是一个三角形，延长边*BC*至*D*。

那么可以说：角*ACD*等于两个内对角*CAB*、*ABC*的和，并且三角形的三个内角和，也就是角*ABC*、*BCA*、*CAB*的和等于两直角。

可设：过点*C*作平行于直线*AB*的直线*CE*。[I. 31]

因为：*AB*平行于*CE*，并且*AC*和它们相交，形成的错角*BAC*、错角*ACE*相等，[I. 29]

因为：*AB*平行于*CE*，且直线*BD*与它们相交，同位角*ECD*与角*ABC*相等，[I. 29]

但已证，角*ACE*等于角*BAC*，

所以：整体角*ACD*等于两内对角*BAC*、*ABC*的和。

将上面各边加上角*ACB*，

可以得出角*ACD*、*ACB*的和等于三个角*ABC*、*BCA*、*CAB*的和。

又因：角*ACD*、*ACB*的和等于两直角，[I. 13]

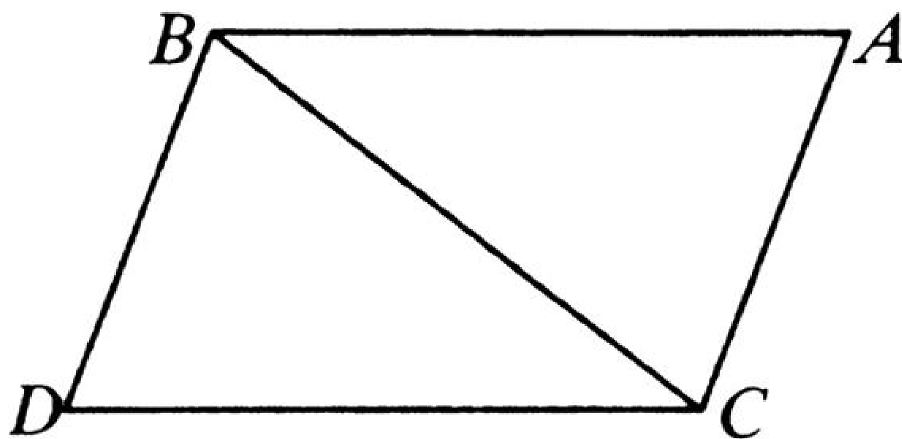
所以：角*ABC*、*BCA*、*CAB*的和等于两直角。

证完。

命题33

…

在同一方向（分别）连接相等且平行的线段端点，那么所连接成的线段也相互平行且相等。



设：*AB*、*CD*是相等且平行的直线，且*AC*、*BD*是沿着同一方向（分别）连接它们端点的线段。

那么可以说：*AC*、*BD*相等且平行。连接*BC*。

因为：*AB*平行*CD*，并且*BC*与它们相交，错角*ABC*与角*BCD*相等，[I. 29]

又因：*AB*等于*CD*，并且*BC*公用，

两边*AB*、*BC*分别等于两边*DC*、*CB*，角*ABC*等于角*BCD*，

所以：底*AC*等于底*BD*，并且三角形*ABC*全等于三角形*DCB*。剩下的角也分别相等，也就是相等边所对的角，[I. 4]

所以：角*ACB*等于角*CBD*。

由于，直线*BC*同时与两直线*AC*、*BD*相交所成的错角相等，*AC*平行于*BD*，[I. 27]

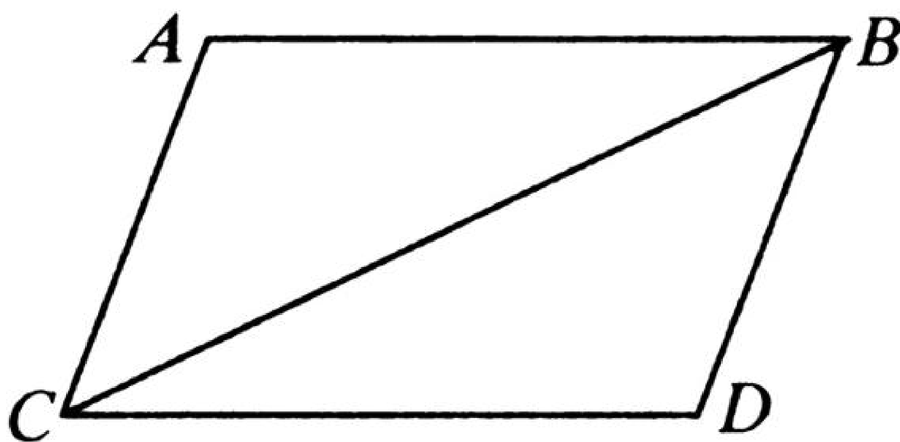
已证它们也相等。

证完。

命题34

…

在平行四边形面中，对边相等，对角相等且对角线二等分其面。



设：*ACDB*是平行四边形面，*BC*是对角线。

那么可以说：平行四边形面*ACDB*的对边相等，对角相等，对角线*BC*二等分此面。

实际上，因为*AB*平行于*CD*，并且直线*BC*和它们相交的错角*ABC*与错角*BCD*相等，[I. 29]

又因：*AC*平行于*BD*，且*BC*与它们相交，内错角*ACB*与*CBD*相等，[I. 29]

所以：*ABC*、*DCB*是有两个角*ABC*、*BCA*分别等于角*DCB*、*CBD*的三角形，并且一条边等于一条边，也就是与等角相邻并且是二者公共的边*BC*，

所以：其余的边也分别相等，其余的角也分别相等，[I. 26]

所以：边AB等于CD，AC等于BD，并且角BAC等于角CDB。

因为：角ABC等于角BCD，角CBD等于角ACB，整体角ABD等于整体角ACD，[公理2]

因此：也证明了角BAC等于角CDB，

所以：在平行四边形面中，对边彼此相等，对角也相等。

然后，证明对角线二等分其图形。

因为：AB等于CD，并且BC公用，

两边AB、BC分别等于两边DC、CB，并且角ABC等于角BCD，

因此：底AC等于底DB，三角形ABC全等于三角形DCB，[I. 4]

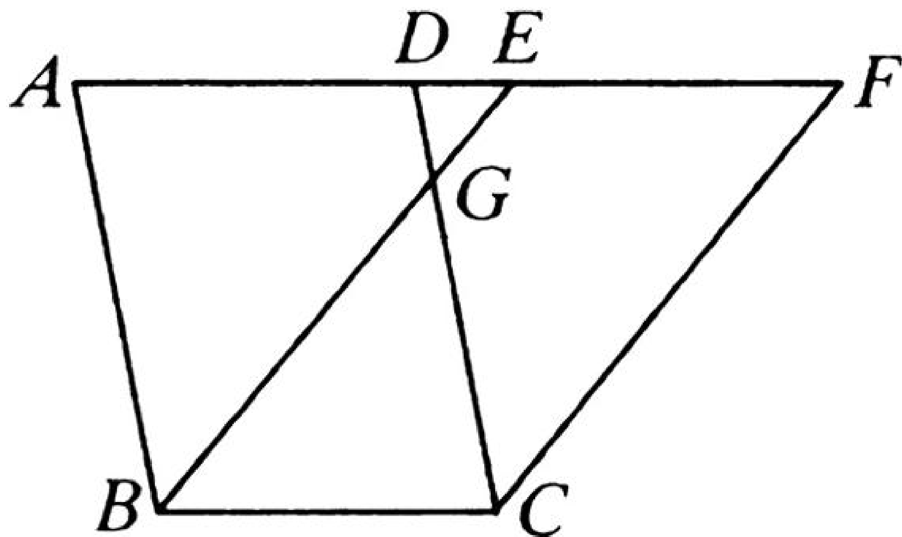
所以：对角线BC二等分平行四边形$ACDB$。

证完。

命题35

…

同底并且在相同两条平行线之间的平行四边形面积彼此相等。



设：*ABCD*、*EBCF*是平行四边形，有着同底*BC*，并且在相同两平行线*AF*、*BC*之间。

那么可以说：平行四边形*ABCD*等于平行四边形*EBCF*。

因为：*ABCD*是平行四边形，因此*AD*等于*BC*，[I. 34]

同理可证：*EF*等于*BC*，而*AD*等于*EF*。[公理1]

又因：*DE*为公用，因此整体*AE*等于整体*DF*，[公理2]

且*AB*等于*DC*，[I. 34]

所以：两边*EA*、*AB*分别等于两边*FD*、*DC*，且由于同位角相等，角*FDC*等于角*EAB*，[I. 29]

因此：底*EB*等于底*FC*，

且三角形*EAB*全等于三角形*FDC*。[I. 4]

从上边每一个减去三角形*DGE*，

那么剩余的不规则四边形仍然相等，即四边形*ABGD*等于四边形*EGCF*。[公理3]

在上面两个图形加上三角形*GBC*，

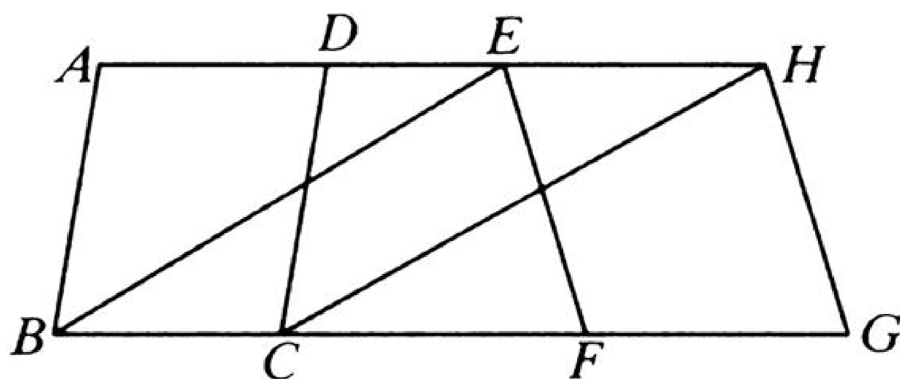
那么整体平行四边形*ABCD*等于整体平行四边形*EBCF*。[公理2]

证完。

命题36

…

等底且在相同两条平行线之间的平行四边形面积彼此相等。



设：*ABCD*、*EFGH*是平行四边形，它们在等底*BC*、*FG*上。并且在相同的平行线*AH*、*BG*之间。

那么可以说：平行四边形*ABCD*面积等于*EFGH*面积。连接*BE*、*CH*。由于*BC*等于*FG*，*FG*等于*EH*，因此*BC*等于*EH*。[公理1]

由于它们也相互平行。

连接*EB*、*HC*；

因为：在同方向（分别）连接相等且平行的（在端点）线段相等且平行，[I. 33]

所以：*EBCH*是一个平行四边形，[I. 34]

并且它等于平行四边形*ABCD*，由于有相同底*BC*，并在相同平行线

BC、*AH*之间。[I. 35]

同理可证：平行四边形*EFGH*等于同一个平行四边形*EBCH*，[I. 35]

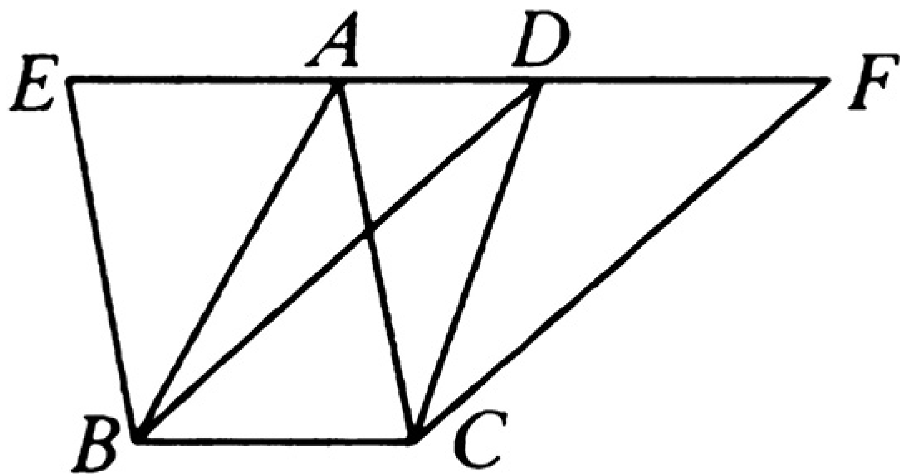
所以：平行四边形*ABCD*等于平行四边形*EFGH*。[公理1]

证完。

命题37

…

同底且在相同两条平行线之间的三角形彼此相等。



设：三角形*ABC*、三角形*DBC*同底，并处在相同平行线*AD*、*BC*之间。

那么可以说：三角形*ABC*等于三角形*DBC*。

向两个方向延长*AD*到*E*、*F*；过*B*点作*BE*平行于*CA*，[I. 31]

过*C*点作*CF*平行于*BD*。

那么图形*EBCA*、图形*DBCF*的每一个都是平行四边形；并且它们相等。

因为：它们在同底BC上，并且在两平行线BC、EF之间，[I. 35]

又因：对角线AB二等分三角形ABC，因此：三角形ABC是平行四边形$EBCA$的一半，[I. 34]

[相等的量一半也彼此相等。]

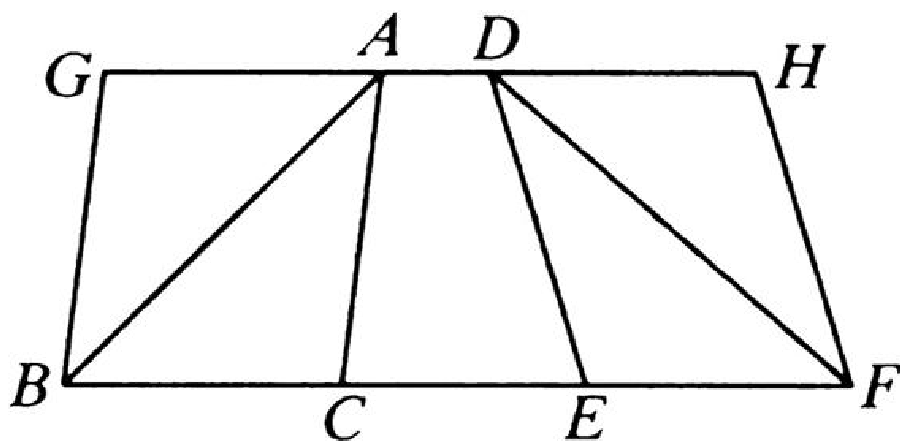
所以：三角形ABC等于三角形DBC。

证完。

命题38

…

等底且在相同两条平行线之间的三角形彼此相等。



设：三角形ABC、三角形DEF在等底BC、EF上，并且在相同两条平行线BF、AD之间。

那么可以说：三角形ABC等于三角形DEF。

因为：向两个方向延长AD至G、H；过B作BG平行于CA，[I. 31]

过F作FH平行于DE，

那么图形*GBCA*、*DEFH*每一个都是平行四边形，并且相等。

因为：它们在等底*BC*、*EF*上，并且在相同的两条平行直线*BF*、*GH*之间，[I. 36]

同时，由于对角线*AB*二等分平行四边形*GBCA*，因此，三角形*ABC*是平行四边形*GBCA*的一半，[I. 34]

又因：对角线*DF*二等分平行四边形*DEFH*，因此，三角形*FED*是平行四边形*DEFH*的一半，[I. 34]

[等量的一半也彼此相等。]

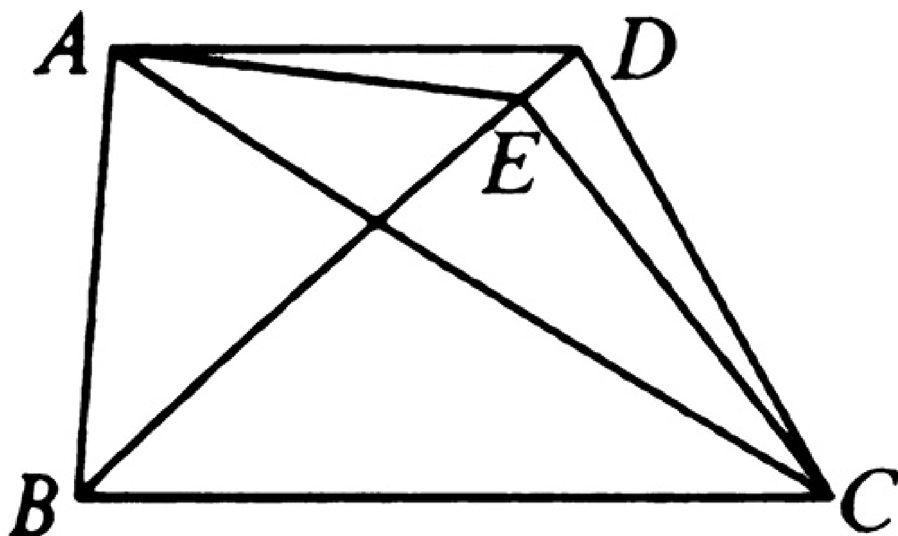
所以：三角形*ABC*等于三角形*DEF*。

证完。

命题39

…

同底且同侧的相等三角形，也在相同的两条平行线之间。



设：*ABC*、*DBC*是相等的三角形，有共同底*BC*，且在*BC*同一侧。

[那么可以说：它们在相同两条平行线之间。]

如果连接AD。

那么可以说：AD平行于BC。因为如果不平行，经过点A作AE平行于直线BC，[I. 31]

连接EC，

所以：三角形ABC等于三角形EBC。

因为：它们在同底BC上，并且在相同的两条平行线之间，[I. 37]

又因：三角形ABC等于三角形DBC，所以：三角形DBC等于三角形EBC，[公理1]

大的等于小的，不符合常理，

所以：AE不能平行于BC。

同理可证：除AD外，任何其他直线都不平行于BC，

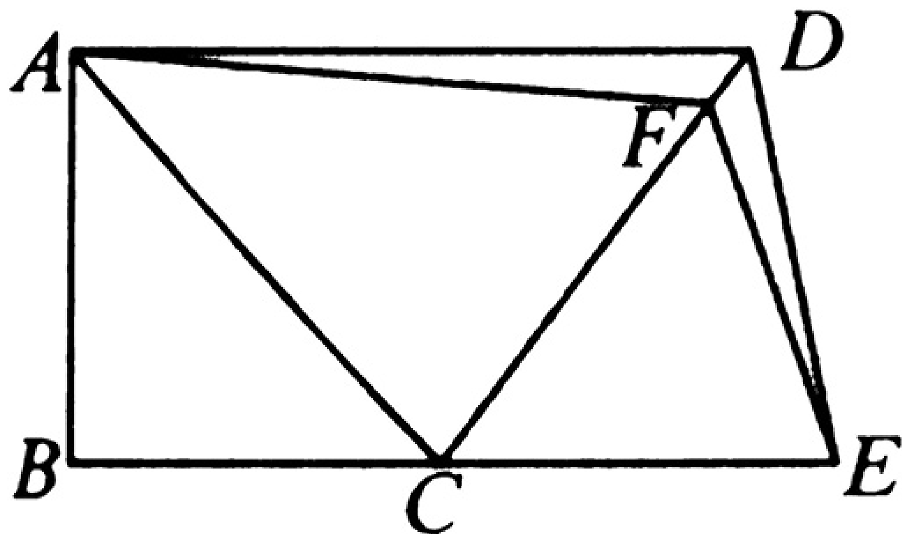
所以：AD平行于BC。

证完。

命题40

…

等底且在同侧的相等三角形也在相同的平行线之间。



设：*ABC*、*CDE*是相等的三角形，并有等底*BC*、*CE*，并在底的同侧。

那么可以说：两个三角形在相同的两条平行线之间。如果连接*AD*。

那么：*AD*平行于*BE*。

假如不是这样，设*AF*经过点*A*，平行于*BE*。[I. 31]

连接*FE*，

所以：三角形*ABC*等于三角形*FCE*。因为它们在等底*BC*、*CE*上，并在相同平行线*BE*、*AF*之间。[I. 38]

但是，三角形*ABC*等于三角形*DCE*，

所以：三角形*DCE*等于三角形*FCE*，

大的等于小的：不符合常理，

所以：*AF*不平行于*BE*。

同理可证：除了*AD*外，其他任何直线都不平行于*BE*，

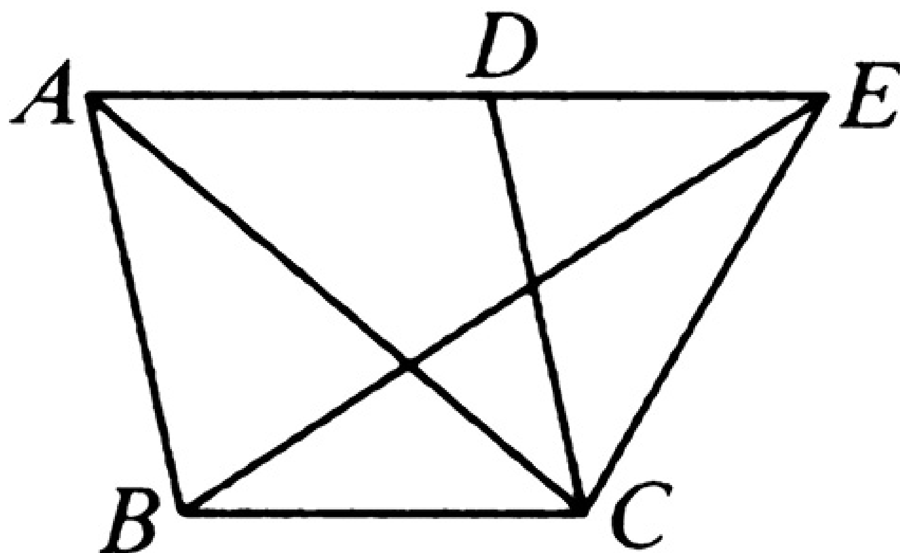
所以：*AD*平行于*BE*。

证完。

命题41

…

若一个平行四边形和一个三角形同底，并且在两条平行线之间，那么平行四边形是这个三角形的二倍。



设：平行四边形*ABCD*和三角形*EBC*有共同底*BC*，又在相同平行线*BC*、*AE*之间。

那么可以说：平行四边形*ABCD*是三角形*BEC*的二倍。

连接*AC*。

因为：三角形*ABC*和三角形*EBC*相等，又有同底*BC*，且二者在相同平行线*BC*、*AE*间，因此两个三角形相等，[I. 37]

又因：对角线*AC*二等分*ABCD*，因此：平行四边形*ABCD*是三角形*ABC*的二倍，[I. 34]

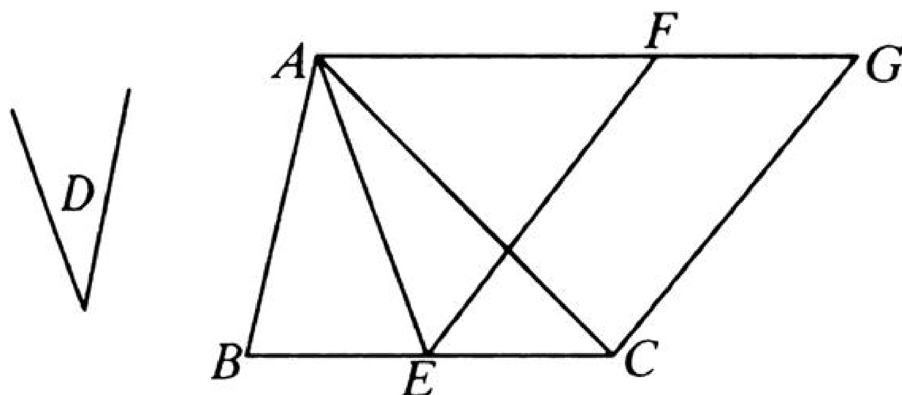
所以：平行四边形*ABCD*也是三角形*EBC*的二倍。

证完。

命题42

…

用给定的直线角作平行四边形，让它等于已知的三角形。



设：*ABC*是已知三角形，且*D*是给定直线角，用直线角*D*作一个平行四边形等于三角形*ABC*。

将*BC*二等分于*E*，连接*AE*；

在直线*EC*上的点*E*作角*CEF*，让它等于给定角*D*。[I. 23]

经过*A*作*AG*平行于*EC*，[I. 31]

经过*C*作*CG*平行于*EF*，

因此：*EFCG*是平行四边形。

因为：*BE*等于*EC*，

又因：在相等的底*BE*、*EC*上，并在相同的平行线*BC*、*AG*之间，

因此：三角形*ABE*等于三角形*AEC*，[I. 38]

所以：三角形*ABC*是三角形*AEC*的二倍。

因为：平行四边形*FECG*等于三角形*AEC*的二倍，因此：它们同底并在相同的平行线之间，[I. 41]

所以：平行四边形*FECG*等于三角形*ABC*，

并且角*CEF*等于给定角*D*，

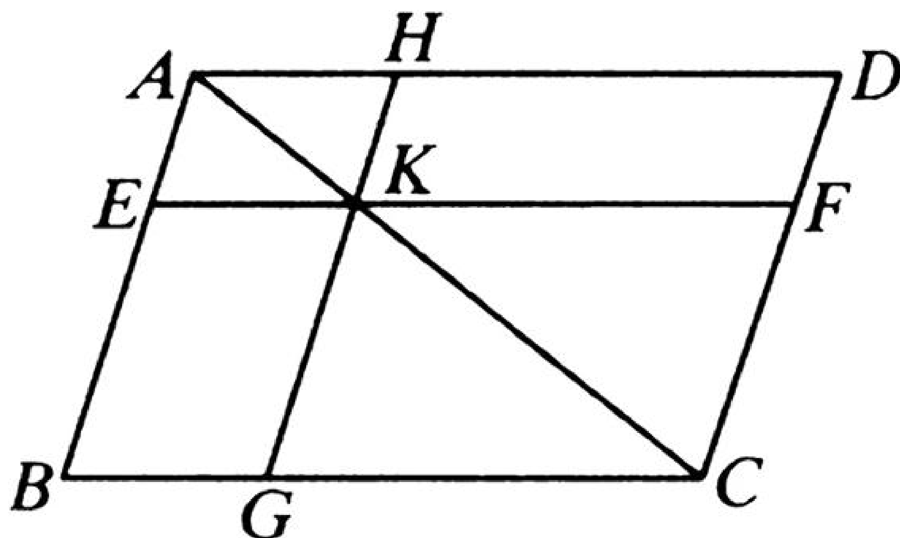
所以：作了平行四边形*FECG*，等于已知三角形*ABC*，并有一个角*CEF*等于给定角*D*。

作完。

命题43

…

在任意平行四边形中，跨在对角线两边平行四边形的补形彼此相等。



设：*ABCD*是平行四边形，*AC*是它的对角线；*AC*也是平行四边形*EH*、*FG*的对角线。把*BK*、*KD*称为补形（也就是填满空间的图形）。

那么可以说：补形*BK*等于补形*KD*。

因为：*ABCD*是平行四边形，并且*AC*是它的对角线。三角形*ABC*等

于三角形ACD，[I. 34]

又因：EH是平行四边形，并且AK是它的对角线，三角形AEK等于三角形AHK，

同理可证：三角形KFC等于三角形KGC。

因为：三角形AEK等于三角形AHK，且KFC等于KGC，因此：三角形AEK与KGC的和等于三角形AHK与KFC的和，[公理2]

又因：整体三角形ABC等于整体三角形ADC，

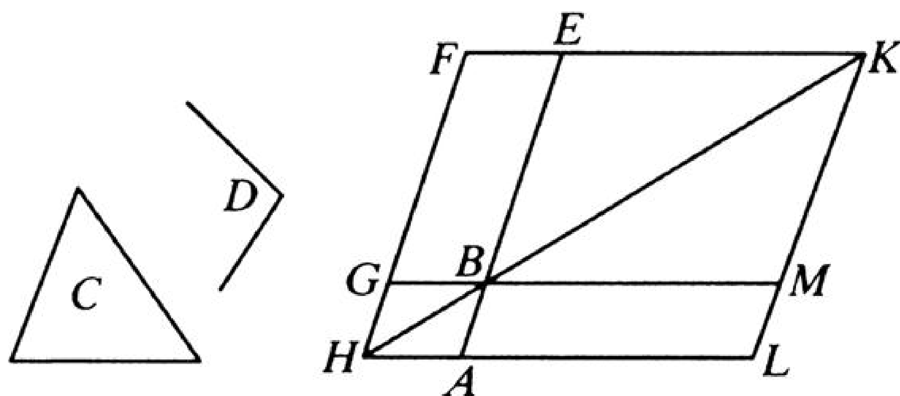
所以：剩下的补形BK等于补形KD。[公理3]

证完。

命题44

…

以给定的直线角，对给定的线段贴合出平行四边形，让它的面积等于给定三角形。



设：AB是已知线段，C是给定三角形，D是给定直线角。求用已知线段AB，以及等于D的一个角，贴合出一个平行四边形，等于给定三角形C。

设：作等于三角形C的平行四边形是$BEFG$，角EBG等于角D，[I. 42]

移动线段BE到直线AB上，延长FG至H，过A作AH平行于BG或EF。[I. 31]

连接HB。

因为：直线HF交平行线AH、EF；角AHF与HFE的和等于两直角，[I. 29]

所以：角BHG和GFE的和小于两直角，且将直线无限延长后在小于两直角的一侧相交，[公设5]

所以：HB、FE延长后会相交，设延长之后交点为K，过点K作KL平行于EA或FH，[I. 31]

设：HA、GB延长至点L、M。

因为：$HLKF$是平行四边形，HK是其对角线；AG、ME是平行四边形；LB、BF是关于HK的补形，

所以：LB等于BF。[I. 43]

因为：BF等于三角形C，因此LB等于C，[公理1]

又因：角GBE等于角ABM，[I. 15]

此时角GBE等于角D，角ABM等于角D，

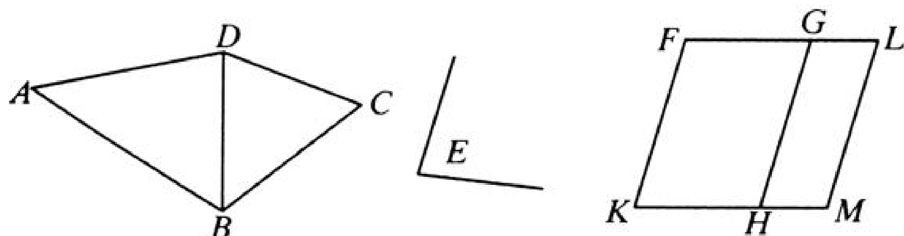
所以：对线段AB贴合出的平行四边形LB等于已知三角形C，并且角ABM等于给定角D。

作完。

命题45

…

用给定直线角作一个平行四边形，使其等于给定的直线形。



设：*ABCD*是给定的直线形，*E*是给定直线角。

要求：作一个平行四边形，使其等于直线形*ABCD*，且角等于给定直线角*E*。

连接*DB*，假设作的等于三角形*ABD*的平行四边形是*FH*，角*HKF*等于角*E*；[I. 42]

设：对线段*GH*贴合一平行四边形*GM*等于三角形*DBC*，角*GHM*等于角*E*。[I. 44]

因为：角*E*等于角*HKF*和角*GHM*，因此：角*HKF*等于角*GHM*，[公理1]

将角*KHG*加在上面各边，得出角*FKH*、*KHG*的和等于角*KHG*、*GHM*的和，

又因：角*FKH*、*KHG*的和等于两直角，[I. 29]

所以：角*KHG*、*GHM*的和等于两直角，

如此，用线段*GH*和它上面的点*H*，不在它同侧的两线段*KH*、*HM*作成相邻的二角和等于两直角，

所以：*KH*和*HM*在同一条直线上。[I. 14]

又因：直线*HG*和平行线*KM*、*FG*相交，错角*MHG*、*HGF*相等，[I. 29]

将角HGL加在以上各边，

那么角MHG、HGL的和等于角HGF、HGL的和。[公理2]

因为：角MHG、HGL的和等于两直角，[I. 29]

所以：角HGF、HGL的和等于两直角，[公理1]

所以：FG和GL在同一条直线上。[I. 14]

因为：FK平行且等于HG，[I. 34]

HG也平行且等于ML，于是，KF也平行且等于ML，[公理1，I. 30]

连接线段KM、FL的端点处，KM与FL平行且相等，[I. 33]

所以：$KFLM$是平行四边形。

因为：三角形ABD等于平行四边形FH，三角形DBC等于平行四边形GM，整体直线形$ABCD$等于整体平行四边形$KFLM$，

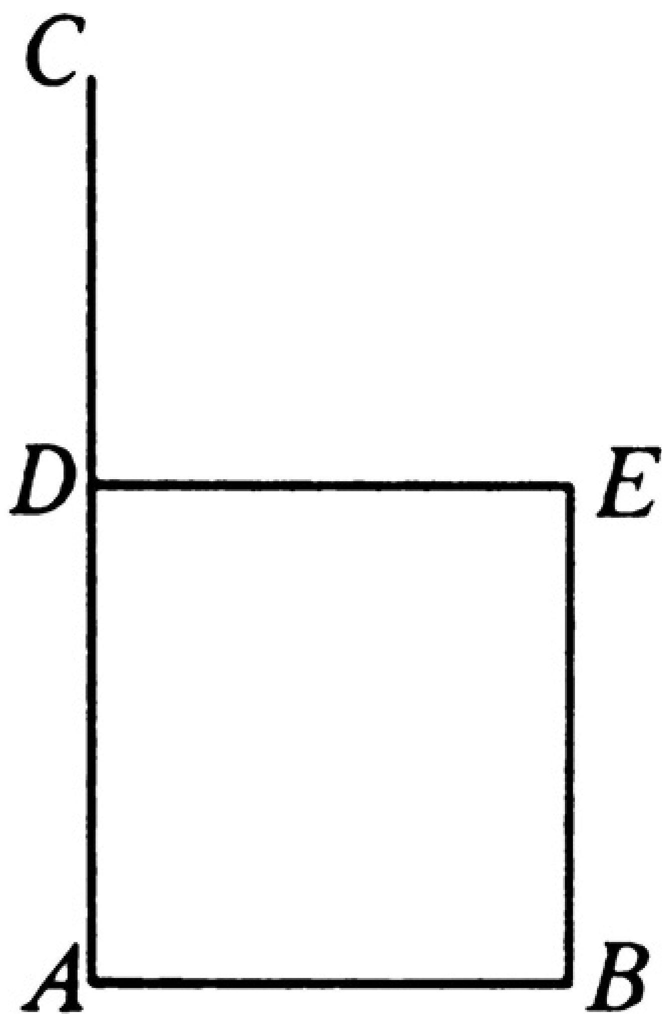
所以：作了一个等于给定直线形$ABCD$的平行四边形$KFLM$，其中，角FKM等于给定角E。

作完。

命题46

…

在给定线段上作正方形。



设：*AB*是给定的线段，要求在*AB*上作一个正方形。

让*AC*是从线段*AB*上的点*A*所画的直线，并与*AB*成直角。[I. 11]

截取*AD*等于*AB*；

过点*D*作*DE*平行于*AB*，过点*B*作*BE*平行于*AD*，因此*ADEB*是平行四边形；从而*AB*等于*DE*，并且*AD*等于*BE*。[I. 34]

因为：*AB*等于*AD*，

所以：四条线段*BA*、*AD*、*DE*、*EB*相等；所以平行四边形*ADEB*等边。

然后，证明四个角都是直角。

因为：线段*AD*和平行线*AB*、*DE*相交，角*BAD*、*ADE*的和等于两直角，[I. 29]

又因：角*BAD*是直角，

因此：角*ADE*也是直角，在平行四边形面中，对边及对角相等，[I. 34]

所以：对角*ABE*、*BED*中的每一个也都是直角，所以*ADEB*是直角。

由于已经证明平行四边形*ADEB*是等边的，

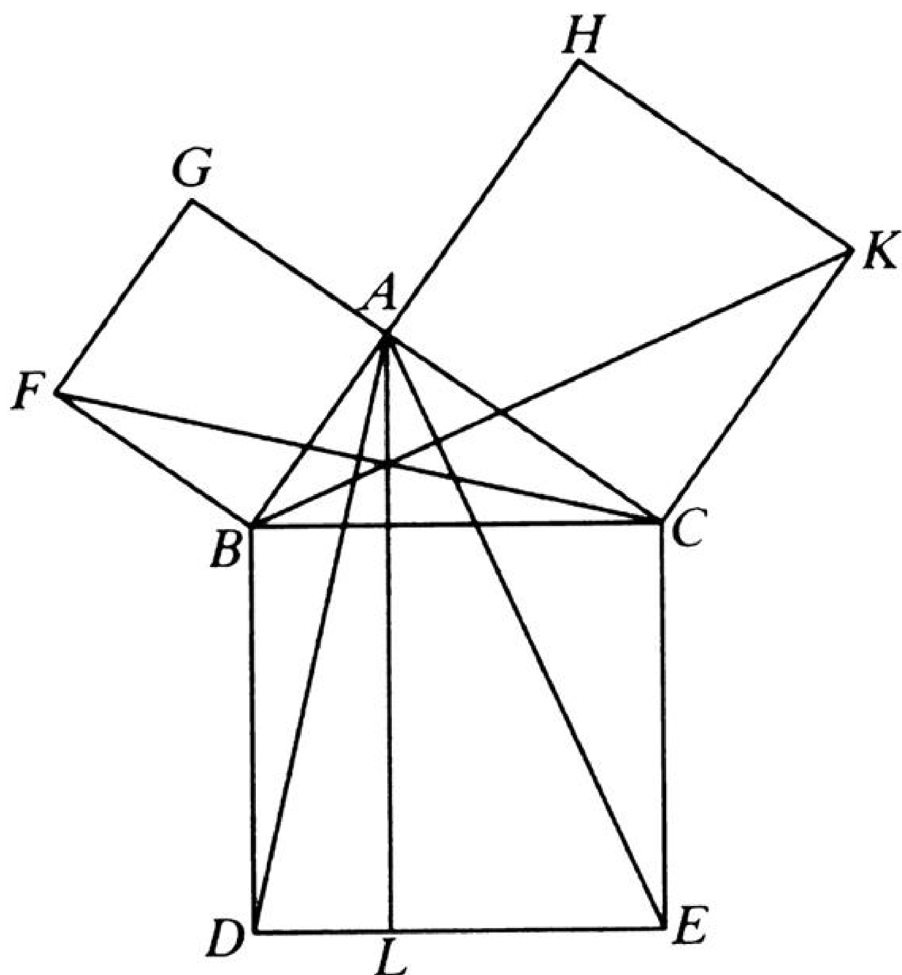
所以：它是在线段*AB*上所作的正方形。

证完。

命题47

…

在直角三角形中，直角所对边上的正方形等于两直角边上的正方形的和。



设：*ABC*是直角三角形，给定角*BAC*是直角。

那么可以说：*BC*上的正方形等于*BA*、*AC*上的正方形之和。

实际上，在*BC*上作正方形*BDEC*，在*BA*、*AC*上作正方形*GB*、*HC*。[I. 46]

过*A*作*AL*平行于*BD*或*CE*，连接*AD*、*FC*。

因为：角*BAC*、*BAG*的每一个角都是直角，过直线*BA*上点*A*的两条直线*AC*与*AG*，不在直线*BA*的同一侧，且和直线*BA*所成的两邻角的和等于两直角，

所以：*CA*与*AG*在同一条直线上。[I. 14]

同理可证：*BA*与*AH*也在同一条直线上。

因为：角*DBC*等于角*FBA*，因为每个角都是直角，给以上两角分别加上角*ABC*，

所以：整体角*DBA*等于整体角*FBC*。[公理2]

因为：*DB*等于*BC*，*FB*等于*BA*；两边*AB*、*BD*分别等于两边*FB*、*BC*。

又因：角*ABD*等于角*FBC*，

所以：底*AD*等于底*FC*，并且三角形*ABD*全等于三角形*FBC*，[I. 4]

所以：平行四边形*BL*等于三角形*ABD*的二倍，由于它们有同底*BD*，并在平行线*BD*、*AL*之间。[I. 41]

因为：正方形*GB*与三角形*FBC*同底*FB*，并且在相同平行线*FB*、*GC*之间，

所以：正方形*GB*是三角形*FBC*的二倍，[I. 41]

[等量的二倍仍彼此相等。]

所以：平行四边形*BL*等于正方形*GB*。

同理可证：连接*AE*、*BK*也能证明平行四边形*CL*等于正方形*HC*，

所以：整体正方形*BDEC*等于两个正方形*GB*、*HC*的和。[公理2]

因为：正方形*BDEC*是在*BC*上作的，正方形*GB*、*HC*是在*BA*、*AC*上作的，

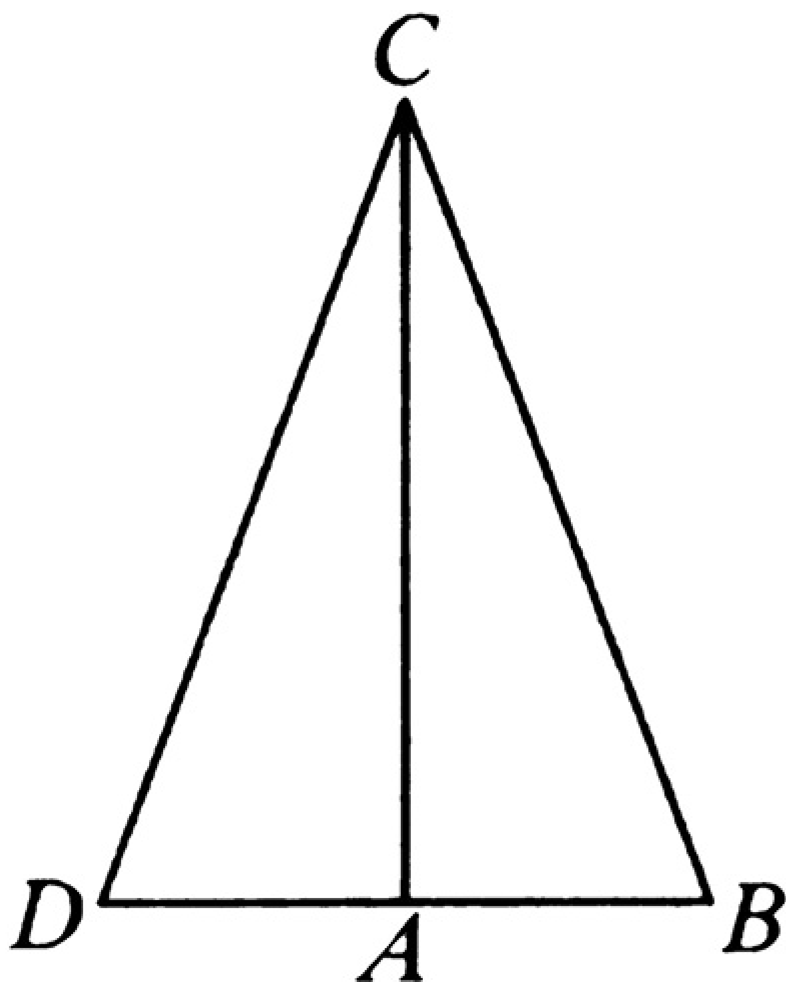
所以：在边*BC*上的正方形等于边*BA*、*AC*上的正方形的和。

证完。

命题48

…

在三角形中，如果一边上的正方形等于另外两边上的正方形的和，那么夹在另外两边之间的角是直角。



设：在三角形*ABC*中，边*BC*上的正方形等于边*BA*、*AC*上的正方形的和。

那么可以说：*BAC*是直角。

设：在点*A*作*AD*与*AC*成直角，取*AD*等于*BA*，连接*DC*。

因为：*DA*等于*AB*，*DA*上的正方形等于*AB*上的正方形，

给上面的正方形各边加上AC上的正方形，

那么DA、AC上的正方形的和等于BA、AC上的正方形的和。

又因：DC上的正方形等于DA、AC上的正方形的和，由于角DAC是直角，[I. 47]

由于假设，BC上的正方形等于BA、AC上的正方形的和，

所以：DC上的正方形等于BC上的正方形，如此，边DC等于边BC。

因为：DA等于AB、AC公用，

两边DA、AC等于两边BA、AC；并且底DC等于底BC，

所以：角DAC等于角BAC。[I. 8]

又因：DAC是直角，

所以：角BAC也是直角。

证完。

卷II

定义

01 称两邻边夹直角的平行四边形为矩形。

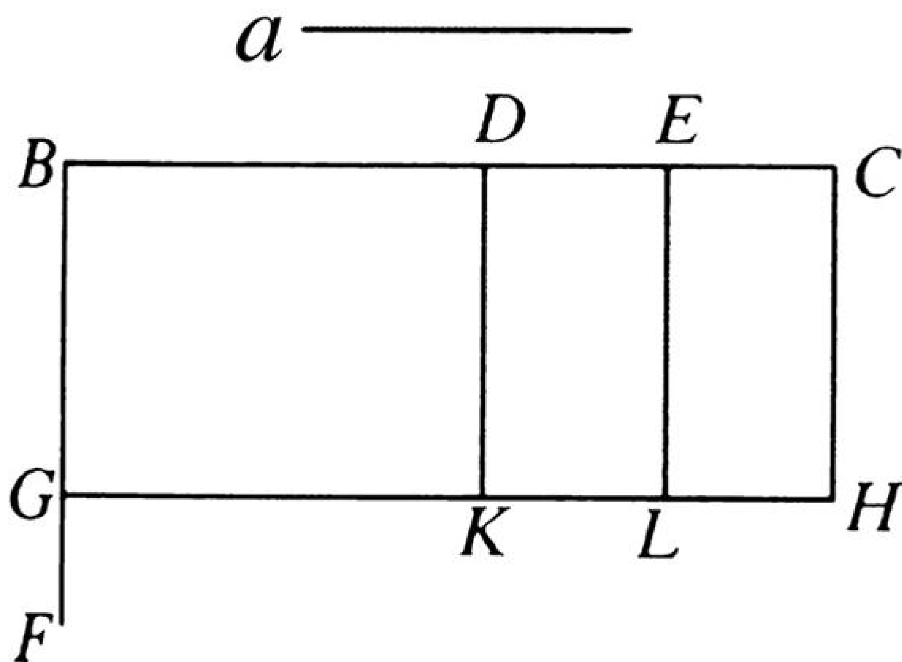
02 在任一平行四边形面中，以此形的对角线为对角线的一个小平行四边形和两个相应的补形一起叫作拐尺形（即矩形）。

命题

命题1

…

假设有两条线段，其中一条被任意截成几段。那么两条线段围成的矩形等于各个小段和未截线段围成的矩形之和。



设：a、BC是两条线段，用点D、E分线段BC。

那么可以说：由a、BC所夹的矩形等于由a、BD与a、DE以及a、EC分别所夹的矩形的和。

因为：从B作BF和BC成直角，[I. 11]

取BG等于a，[I. 3]

过G作GH平行于BC，[I. 31]

并经过点D、E、C，作DK、EL、CH平行于BG。

那么BH等于BK、DL、EH的和。

BH是矩形a、BC，由于它是由GB和BC围成的，并且BG等于a，

BK是矩形a、BD，由于它是由GB、BD围成的，并且BG等于a，

又因：DL是矩形a、DE，由于DK是BG并且等于a，[I. 34]

同理可证：EH也是矩形a、EC，

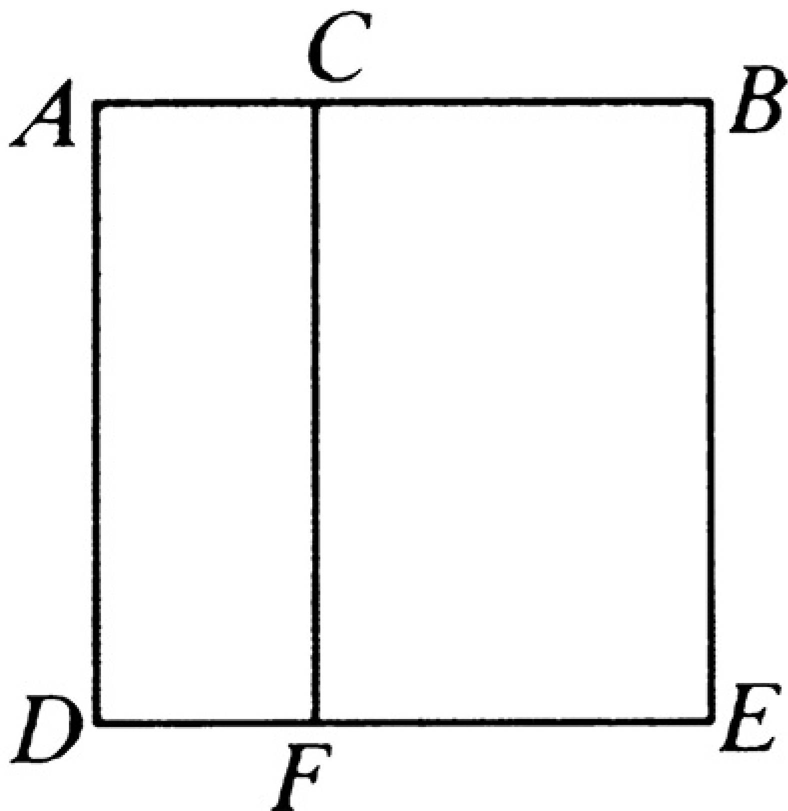
所以：矩形a、BC等于矩形a、BD与矩形a、DE及矩形a、EC的和。

证完。

命题2

…

若将一条线段任意分成两段，那么这两条线段分别围成的矩形之和等于在原线段上所作成的正方形。



设：任意两分线段AB于点C。

那么可以说：由AB、BC所夹的矩形与BA、AC所夹的矩形的和等于AB上的正方形。

设：在AB上作的正方形为$ADEB$。[I. 46]

经过点C作CF平行于AD或BE。[I. 31]

那么AE等于AF与CE的和。

因为：AE是AB上的正方形，

AF是由BA、AC围成的矩形，因为它是由DA、AC围成，且AD等于AB，

又因：BE等于AB，

因此：CE是由AB、BC围成的矩形，

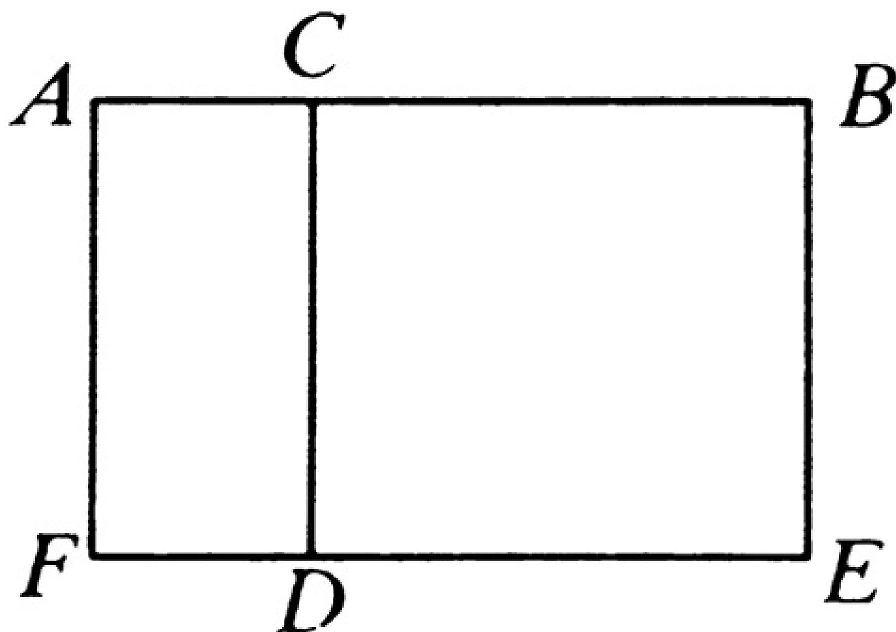
所以：矩形BA、AC与矩形AB、BC的和等于AB上的正方形。

证完。

命题3

…

若任意两分一条线段，那么整条线段与小线段之一围成的矩形等于两线段围成的矩形，与前面提到的小线段上的正方形的和。



设：任意两分线段AB于C。

那么可以说：由AB、BC围成的矩形等于由AC、CB围成的矩形与BC上的正方形的和。

在CB上作正方形$CDEB$，[I. 46]

延长ED至F，过A作AF平行于CD或者BE。[I. 31]

那么AE等于AD与CE的和。

因为：AE是由AB、BC所围成的矩形，这是因为它是由AB、BE所围成的，且BE等于BC，

又因：DC等于CB，并且DB是CB上的正方形，

因此：AD是矩形AC、CB，

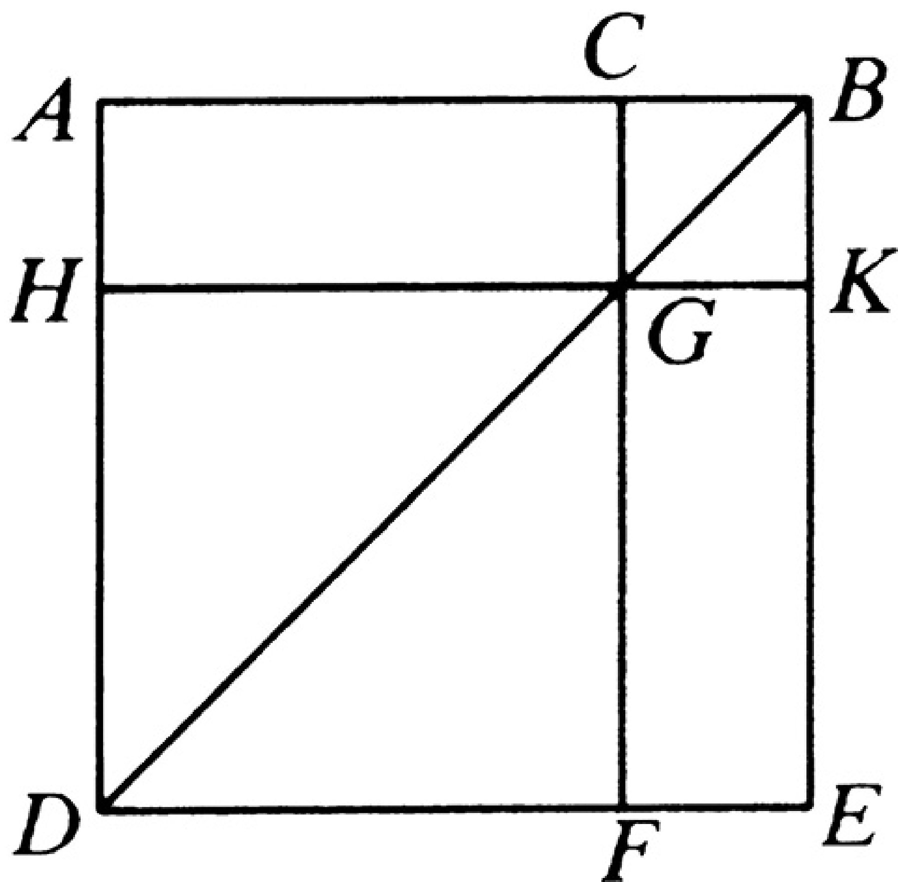
所以：AB、BE围成的矩形等于由AC、CD围成的矩形与BC上的正方形的和。

证完。

命题4

…

两分一条线段，那么在整条线段上的正方形等于各小线段上的正方形与两小线段围成矩形的二倍之和。



设：任意线段AB分于C。

那么可以说：AB上的正方形等于AC及CB上的正方形的和，加上AC、CB围成的矩形的二倍。

让AB上所作的正方形为ADEB，[I. 46]

连接BD，过点C作CF平行于AD或EB，过点G作HK平行于AB或DE。[I. 31]

因为：CF平行于AD，且BD与CF、AD都相交，那么同位角CGB、ADB相等，[I. 29]

且因边BA等于边AD，

因此：角ADB等于角ABD，[I. 5]

所以：角CGB等于角GBC，边BC等于边CG。[I. 6]

因为：CB等于GK，CG等于KB，[I. 34]

所以：GK等于KB，

所以：$CGKB$是等边的。

然后，又可证明$CGKB$是直角。

因为：CG平行于BK。角KBC、角GCB的和等于两直角，[I. 29]

又因：角KBC是直角，

所以：角BCG也是直角，对角CGK及角GKB同样是直角，[I. 34]

所以：$CGKB$四个角都是直角，由于已经证明它是等边，因此它是正方形，从而推出$CGKB$是作在CB上的正方形。

同理可证：HF也是正方形，它是作在HG上的，也就是作在AC上的正方形，[I. 34]

所以：正方形HF、KC是作在AC、CB上的正方形。

因为：AG等于GE，并且AG是矩形AC、CB，且GC等于CB，

所以：GE等于矩形AC、CB，

所以：AG、GE的和等于矩形AC、CB的二倍。

因为：正方形HF，CK的和等于AC、CB上的正方形的和，

所以：四个面HF、CK、AG、GE等于AC、CB上的正方形加上AC、CB围成的矩形的二倍。

又因为：HF、CK、AG、GE的和是整体$ADEB$，它就是AB上的正方形，

所以：AB上的正方形等于AC、CB上的正方形的和加上AC、CB围成

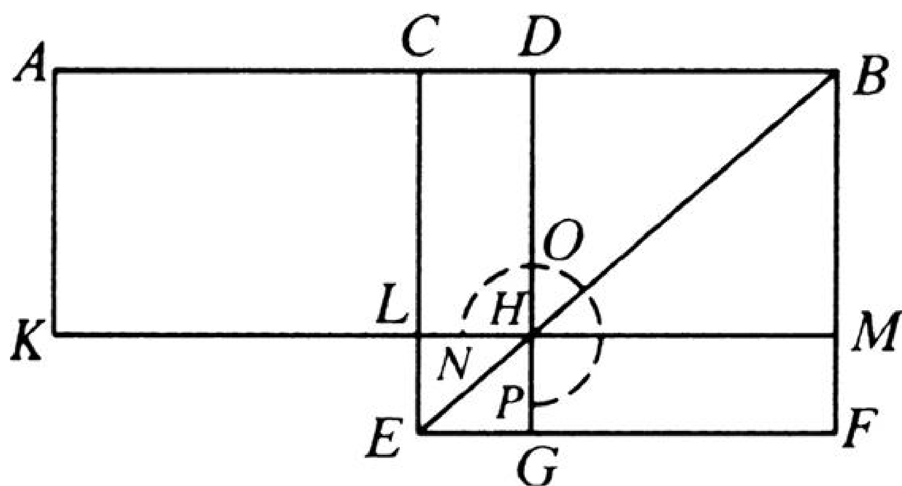
的矩形的二倍。

证完。

命题5

…

若一条线段既被分成相等线段，又被分成不相等的线段，那么由不相等的线段围成的矩形与两个分点之间的一段上的正方形的和等于原来线段一半上的正方形。



设：由点*C*将线段*AB*分成相等的两线段，用点*D*将线段*AB*分成不相等的两线段。

那么可以说：*AD*、*DB*围成的矩形加上*CD*上的正方形的和等于*CB*上的正方形。

设：*CEFB*是作在*CB*上的正方形。[I. 46]

连接*BE*，过*D*作*DG*平行于*CE*或*BF*，过*H*作*KM*平行于*AB*或*EF*，再过*A*作*AK*平行于*CL*或*BM*，[I. 31]

那么：补形*CH*等于补形*HF*。[I. 43]

将*DM*加在以上两边，那么整体*CM*等于整体*DF*。

因为：*AC*等于*CB*，

所以：*CM*等于*AL*，[I. 36]

*AL*等于*DF*。

将*CH*加在以上各边，那么整个*AH*等于拐尺形*NOP*。

因为：*DH*等于*DB*，

所以：拐尺形*NOP*等于矩形*AD*、*DB*。

*LG*等于*CD*上的正方形，将它加在以上各边，

那么：拐尺形*NOP*与*LG*的和等于*AD*、*DB*围成的矩形与*CD*上的正方形的和。

又因：拐尺形*NOP*与*LG*的和是*CB*上的整体正方形*CEFB*，

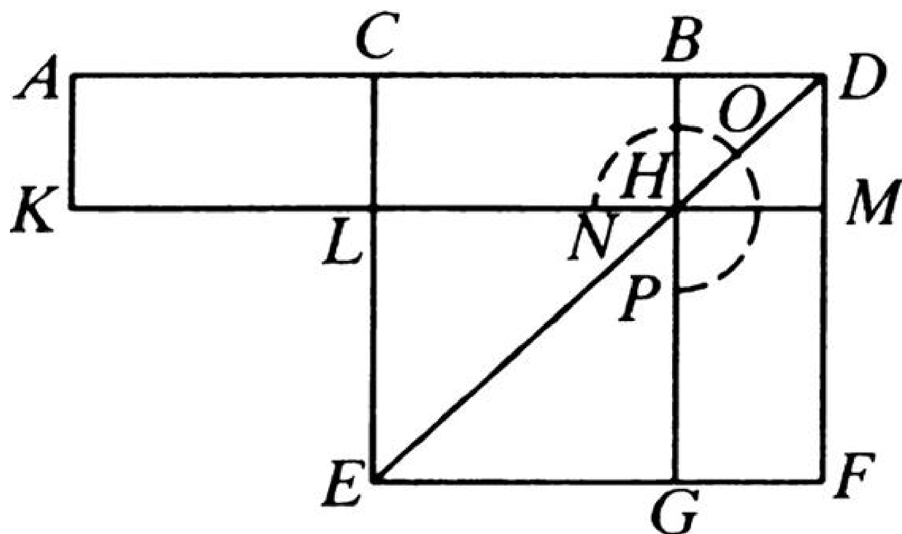
所以：*AD*、*DB*围成的矩形与*CD*上的正方形的和等于*CB*上的正方形。

证完。

命题6

…

若将一条线段二等分，并沿同一条线段给它加上一条线段，那么合成的线段与加上的线段围成的矩形，以及原线段一半上的正方形的和，等于原线段一半与加上的线段合成线段上的正方形。



设：点*C*平分线段*AB*，在同一直线上加上线段*BD*。

那么可以说：*AD*、*DB*围成的矩形与*CB*上的正方形的和等于*CD*上的正方形。

设：*CEFD*是在*CD*上所作的正方形。[I. 46]

连接*DE*，过点*B*作*BG*平行于*EC*或*DF*，过点*H*作*KM*平行于*AB*或*EF*，过点*A*作*AK*平行于*CL*或*DM*。[I. 31]

因为：*AC*等于*CB*，*AL*等于*CH*，[I. 36]

又因：*CH*等于*HF*，[I. 43]

所以：*AL*等于*HF*。

将*CM*加在各边，

那么：整个*AM*等于拐尺形*NOP*。

又因：*AM*是由*AD*、*DB*围成的矩形，且*DM*等于*DB*，

所以：拐尺形*NOP*等于矩形*AD*、*DB*。

将*LG*加在以上各边，等于*BC*上的正方形，

所以：AD、DB围成的矩形与CB上的正方形的和等于拐尺形NOP与LG的和。

又因：拐尺形NOP与LG是作在CD上的整体正方形$CEFD$，

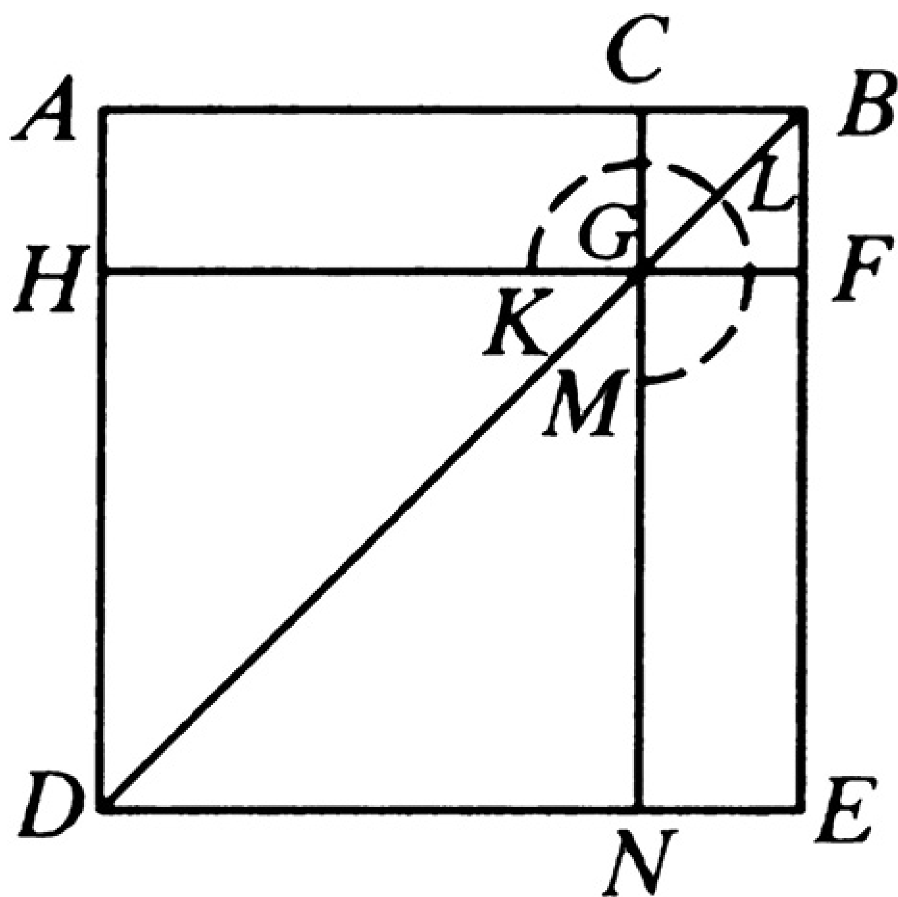
所以：由AD、DB围成的矩形与CB上的正方形的和等于CD上的正方形。

证完。

命题7

…

若将一条线段任意分为两段，那么整条线段上的正方形与所分成小段上的正方形的和等于整条线段与该小线段围成的矩形的二倍与另一小线段上的正方形的和。



设：线段*AB*被点*C*任意分为两段。

那么可以说：*AB*、*BC*上的正方形的和等于*AB*、*BC*围成的矩形的二倍与*CA*上的正方形的和。

设：在*AB*上所作的正方形为*ADEB*，[I. 46]

并且图已作。[I. 46]

因为：*AG*等于*GE*，[I. 43]

将*CF*加在以上各边，那么整体*AF*等于整体*CE*，因此*AF*、*CE*的和是*AF*的二倍，

因为：*AF*、*CE*的和是拐尺形*KLM*与正方形*CF*的和，

所以：拐尺形KLM与正方形CF的和是AF的二倍。

又因：矩形AB、BC的二倍也是AF的二倍，且BF等于BC，

所以：拐尺形KLM与正方形CF的和等于二倍的矩形AB、BC。

将DG加在以上各边，DG是AC上的正方形，

所以：拐尺形KLM与正方形BG、GD的和，等于AB、BC围成的矩形的二倍与AC上的正方形的和。

因为：拐尺形KLM与正方形BG、GD的和是整体$ADEB$与CF的和，它们是在AB、BC上所作的正方形，

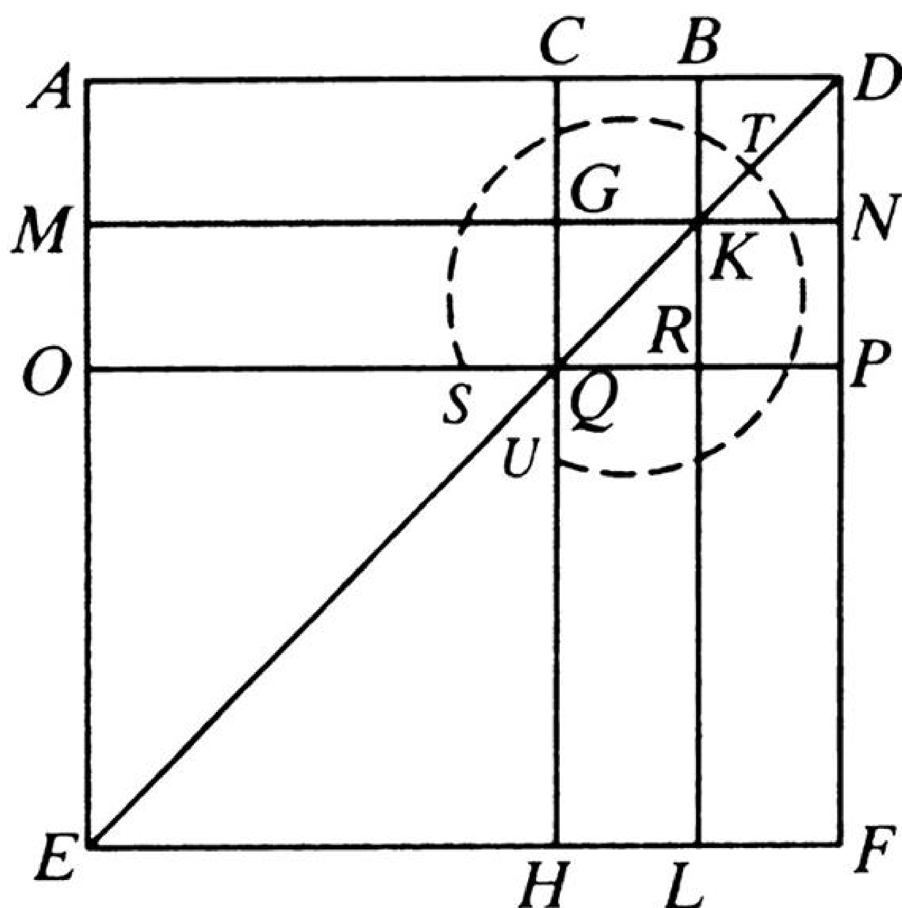
所以：AB、BC上的正方形的和等于AB、BC围成的矩形的二倍与AC上的正方形的和。

证完。

命题8

…

若将一条线段任意分为两段，用整线段和一条小线段围成的矩形的四倍与另一小线段上的正方形的和等于整线段与前一小线段合成的直线上的正方形。



设：线段*AB*分于*C*。

那么可以说：*AB*、*BC*所夹的矩形的四倍与*AC*上的正方形的和，等于*AB*与*BC*合成直线上的正方形。

延长线段*AB*至*D*，使*BD*等于*CB*，假设画在*AD*上的正方形是*AEFD*，并且作这样两个图。

因为：*CB*等于*BD*，且*CB*等于*GK*，并且*BD*等于*KN*，

所以：*GK*等于*KN*。

同理可证：*QR*等于*RP*。

又因：*BC*等于*BD*，*GK*等于*KN*，

所以：CK等于KD，GR等于RN。[I. 36]

又因：CK和RN是平行四边形CP的补形，

所以：CK等于RN，[I. 43]

所以：KD等于GR，四个面DK、CK、GR、RN都彼此相等，

因此：这四个面的和是CK的四倍。

又因：CB等于BD，

BD等于BK，也是CG，并且CB等于GK，也是GQ，故CG等于GQ。

并且CG等于GQ，并且QR等于RP，

AG等于MQ，QL等于RF，[I. 36]

又因：MQ和QL是平行四边形ML的补形，因此MQ等于QL，[I. 43]

所以：AG等于RF，

故，四个面AG、MQ、QL、RF彼此相等，

所以：这四个面的和是AG的四倍。

因为：四个面CK、KD、GR、RN已被证明它们的和是CK的四倍，

所以：这八个面构成的拐尺形STU是AK的四倍。

又因：BK等于BD，

所以：AK是矩形AB、BD，故四倍的矩形AB、BD是AK的四倍。

因为：拐尺形STU已经被证明了是AK的四倍，

所以：矩形AB、BD的四倍等于拐尺形STU。

将OH加在以上各边，等于AC上的正方形，

所以：矩形AB、BD的四倍与AC上的正方形的和等于拐尺形STU与OH的和。

又因：拐尺形STU与OH的和等于作在AD上的整体正方形$AEFD$，

所以：四倍的矩形AB、BD与AC上的正方形的和等于AD上的正方形。

又因：BD等于BC，

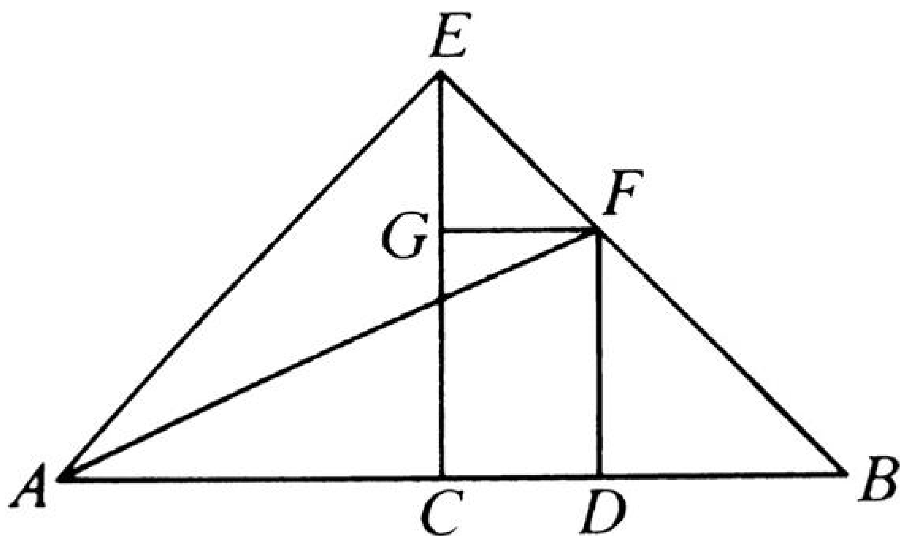
所以：四倍的矩形AB、BC与AC上的正方形的和等于AD上的正方形，也就是AB与BC合成直线上的正方形。

证完。

命题9

…

若一条线段既被分成相等的两段，又被分成不相等的两段，那么在不相等的各线段上的正方形的和，等于原线段一半上的正方形与两个分点之间一段上的正方形的和的二倍。



设：线段*AB*被点*C*分成相等的线段，又被点*D*分成不相等的线段。

那么可以说：*AD*、*DB*上的正方形的和等于*AC*、*CD*上的正方形的和的二倍。

因为：从*AB*上的点*C*作*CE*和*AB*成直角，并且它与*AC*或*CB*相等。连接*EA*、*EB*。经过点*D*作*DF*平行于*EC*，并且过*F*作*FG*平行于*AB*，连接*AF*，

并且*AC*等于*CE*，角*EAC*等于角*AEC*，

又因：在点*C*的角是直角，其余两个角*EAC*、*AEC*的和等于直角，[I. 32]

且它们又相等，

所以：角*CEA*、*CAE*各是直角的一半。

同理可证：角*CEB*、*EBC*各是直角的一半，

所以：整体角*AEB*是直角。

又因：*GEF*是直角的一半，角*EGF*是直角，由于它与角*ECB*是同位角，[I. 29]

剩下的角*EFG*是直角的一半，[I. 32]

所以：角*GEF*等于角*EFG*，

由此，边*EG*等于边*GF*。[I. 6]

又因：在点*B*处的角是直角的一半，并且因为角*FDB*与角*ECB*是同位角，所以角*FDB*是直角，[I. 29]

剩下的角*BFD*是直角的一半，[I. 32]

所以：在点*B*处的角等于角*DFB*，

由此，边*FD*等于边*DB*。

因为：AC等于CE，AC上的正方形等于CE上的正方形，

所以：AC、CE上的正方形的和是AC上的正方形的二倍。

又因：角ACE是直角，所以EA上的正方形等于AC、CE上的正方形的和，[I. 47]

所以：EA上的正方形是AC上的正方形的二倍。

又因：EG等于GF；EG上的正方形等于GF上的正方形，

所以：EG、GF上的正方形的和等于GF上的正方形的二倍。

又因：EF上的正方形等于EG、GF上的正方形的和，

所以：EF上的正方形是GF上的正方形的二倍。

又因：GF等于CD，[I. 34]

所以：EF上的正方形是CD上的正方形的二倍。

因为：EA上的正方形也是AC上的正方形的二倍，

所以：AE、EF上的正方形的和是AC、CD上的正方形的和的二倍。

又因：角AEF是直角，

所以：AF上的正方形等于AE、EF上的正方形的和，[I. 47]

所以：AF上的正方形是AC、CD上的正方形的和的二倍。

因为：在点D的角是直角，

所以：AD、DF上的正方形的和等于AF上的正方形，[I. 47]

所以：AD、DF上的正方形的和是AC、CD上的正方形的和的二倍。

又因：DF等于DB，

所以：AD、DB上的正方形的和等于AC、CD上的正方形的和的二

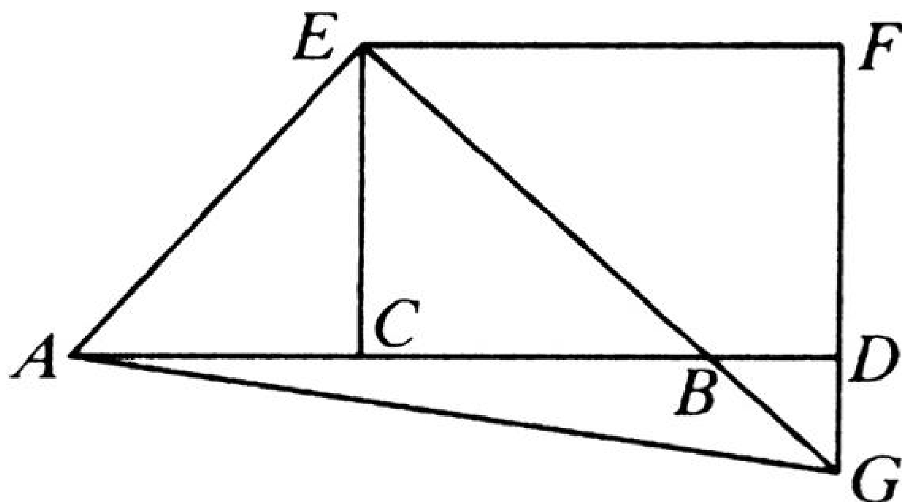
倍。

证完。

命题10

…

将一条线段二等分，且在同一直线上再给原线段添加上一条线段，那么合成线段上的正方形与添加线段上的正方形的和等于原线段一半上的正方形与一半线段和添加线段所合成的正方形的和的二倍。



用点*C*将线段*AB*二等分，并在同一直线上给*AB*添上*BD*。

那么可以说：*AD*、*DB*上的正方形的和等于*AC*、*CD*上的正方形的和的二倍。

设：*CE*在*C*点和*AB*成直角，[I. 11]

让它等于*AC*或*CB*。[I. 3]

连接*EA*、*EB*，过点*E*作*EF*平行于*AD*，过点*D*作*FD*平行于*EC*。[I. 31]

因为：直线*EF*和平行线*EC*、*FD*都相交，角*CEF*、*EFD*的和等于两直

角，[I. 29]

所以：角*FEB*、*EFD*的和小于两直角。

又因：直线在小于两直角的这一侧经延长后相交，[I. 公设5]

所以：若在同方向*B*、*D*延长*EB*、*FD*定相交。

设：其交点为*G*，连接*AG*。

因为：*AC*等于*CE*，角*EAC*等于角*AEC*，[I. 5]

在点*C*是直角，

所以：角*EAC*、*AEC*各是直角的一半。[I. 32]

同理可证：角*CEB*、*EBC*各是直角的一半，

因此：角*AEB*是直角。

又因：角*EBC*是直角的一半，角*DBG*也是直角一半，[I. 15]

并且角*BDG*与角*DCE*相等，且它们是错角，因此：角*BDG*也是直角，[I. 29]

所以：剩下的角*DGB*是直角的一半，[I. 32]

故，角*DGB*等于角*DBG*，

所以：边*BD*等于边*GD*。[I. 6]

又因：角*EGF*等于在点*C*处的对角，故角*EGF*是直角的一半，且在点*F*处的是直角，[I. 34]

剩下的角*EFC*是直角的一半，[I. 32]

所以：角*EGF*等于角*FEG*，

边*GF*等于*EF*。

因为：EC上的正方形等于CA上的正方形；EC、CA上的正方形的和是CA上的正方形的二倍，

又因：EA上的正方形等于EC、CA上的正方形的和，[I. 47]

所以：EA上的正方形是AC上的正方形的二倍。[公理1]

因为：FG等于EF、FG上的正方形等于FE上的正方形，

所以：GF、FE上的正方形的和是EF上的正方形的二倍。

又因：EG上的正方形等于GF、FE上的正方形的和，[I. 47]

所以：在EG上的正方形是在EF上的正方形的二倍，EF等于CD，[I. 34]

所以：EG上的正方形是CD上的正方形的二倍。

又因：已证EA上的正方形是AC上的正方形的二倍，

所以：AE、EG上的正方形的和是AC、CD上的正方形的和的二倍。

又因：在AG上的正方形等于AE、EG上的正方形的和，[I. 47]

所以：AG上的正方形是AC、CD上的正方形的和的二倍。

因为：AD、DG上的正方形的和等于AG上的正方形，[I. 47]

所以：AD、DG上的正方形的和是AC、CD上的正方形的和的二倍，

又因：DG等于DB，

所以：AD、DB上的正方形的和是AC、CD上的正方形的和的二倍。

证完。

命题11

…

将已知线段切分，让它和一条小线段围成的矩形等于另一小段上的正方形。

设：将已知线段*AB*分成两段，让它和一小线段所夹的矩形等于另一小线段上的正方形。

设：在*AB*上作正方形*ABDC*。[I. 46]

将*AC*二等分于点*E*，连接*BE*，延长*CA*到*F*，取*EF*等于*BE*。

设：*FH*是作在*AF*上的正方形，延长*GH*至*K*。

那么可以说：*H*就是*AB*上所要求作的点，它让*AB*、*BH*所夹的矩形

等于*AH*上的正方形。

因为：线段*AC*被点*E*平分，并给它加上*FA*，

CF、*FA*所夹的矩形与*AE*上的正方形的和等于*EF*上的正方形，[II. 6]

又因：*EF*等于*EB*，

所以：矩形*CF*、*FA*与*AE*上的正方形的和等于*EB*上的正方形。

因为：在点*A*的角是直角，

所以：*BA*、*AE*上的正方形的和等于*EB*上的正方形，[I. 47]

所以：矩形*CF*、*FA*与*AE*上的正方形的和等于*BA*、*AE*上的正方形的和。

将上面两边各减去*AE*上的正方形，

那么：剩下的矩形*CF*、*FA*等于*AB*上的正方形。

矩形*CF*、*FA*的和是*FK*，由于*AF*等于*FG*，且*AB*上的正方形是*AD*，

所以：*FK*等于*AD*。

将上面两边各减去*AK*，余下的部分*FH*等于*HD*。

又因：*HD*是矩形*AB*、*BH*，又因为*AB*等于*BD*，并且*FH*是*AH*上的正方形，

所以：由*AB*、*BH*围成的矩形等于*HA*上的正方形，

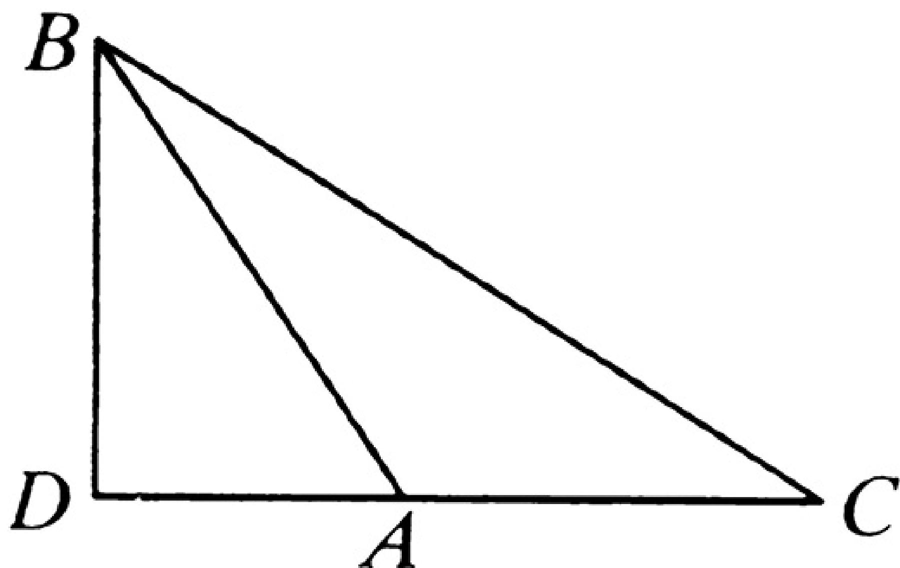
所以：点*H*分已知的线段*AB*，由*AB*、*BH*围成的矩形等于*HA*上的正方形。

作完。

命题12

…

在钝角三角形中，钝角所对的边上的正方形比夹钝角的两边上的正方形的和还大一个矩形的二倍，这个矩形是由钝角的一边向外延长并作垂线，垂足到钝角之间一段与另一边围成的矩形。



设：在*ABC*是钝角三角形，角*BAC*为钝角。由点*B*作*BD*垂直于*CA*，交延长线于点*D*。

那么可以说：*BC*上的正方形比*BA*、*AC*上的正方形的和还大*CA*、*AD*围成矩形的二倍。

因为：点*A*任意分线段*CD*，*CD*上的正方形等于*CA*、*AD*上的正方形加上*CA*、*AD*所夹的矩形的二倍，[II. 4]

将*DB*上的正方形加在以上各边，

所以：*CD*、*DB*上的正方形的和等于*CA*、*AD*、*DB*上的正方形的和加上矩形*CA*、*AD*的二倍。

又因：在点*D*的角都是直角，因此：*CB*上的正方形等于*CD*、*DB*上的正方形的和，[I. 47]

且*AB*上的正方形等于*AD*、*DB*上的正方形的和，[I. 47]

所以：*CB*上的正方形等于*CA*、*AB*上的正方形的和加上*CA*、*AD*围成的矩形的二倍，

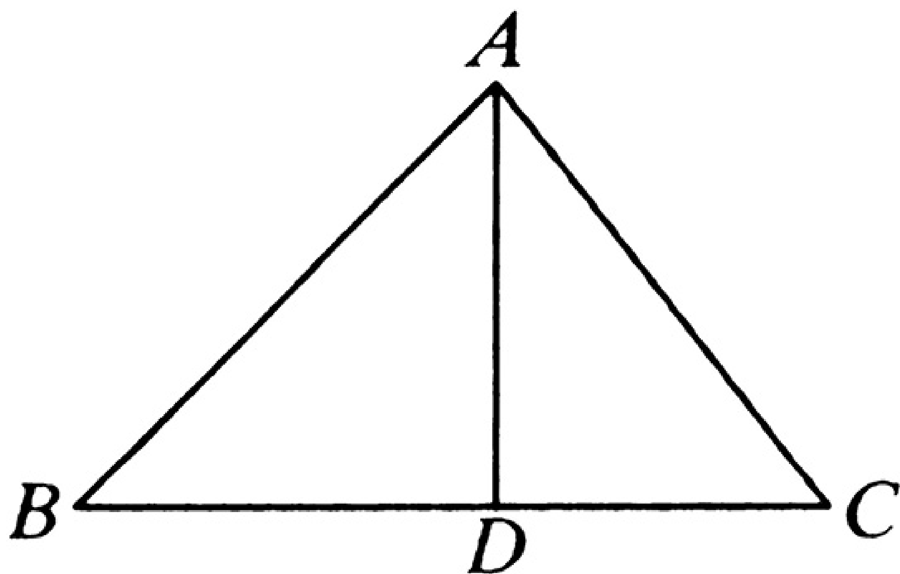
所以：*CB*上的正方形比*CA*、*AB*上的正方形的和还大*CA*、*AD*围成的矩形的二倍。

证完。

命题13

…

在锐角三角形中，锐角对边上的正方形比夹锐角两边上的正方形的和小一个矩形的二倍。也就是由另一个锐角向对边作垂直线，垂足到原锐角顶点之间一段与该边所夹的矩形。



设：*ABC*是锐角三角形，点*B*处的角为锐角，并且设*AD*是由点*A*向*BC*所作的垂线。

那么可以说：*AC*上的正方形比*CB*、*BA*上的正方形的和小*CB*、*BD*围

成的矩形的二倍。

因为：*CB*任意分割于点*D*；*CB*、*BD*上的正方形的和等于由*CB*、*BD*围成矩形的二倍与*DC*上的正方形的和，[II. 7]

将*DA*上的正方形加在以上各边，

那么：*CB*、*BD*、*DA*上的正方形的和等于*CB*、*BD*围成的矩形的二倍加上*AD*、*DC*上的正方形的和。

因为：在*D*处的角都是直角，因此：*AB*上的正方形等于*BD*、*DA*上的正方形的和，[I. 47]

并且，*AC*上的正方形等于*AD*、*DC*上的正方形的和，因此：*CB*、*BA*上的正方形的和等于*AC*上的正方形加上二倍的矩形*CB*、*BD*，

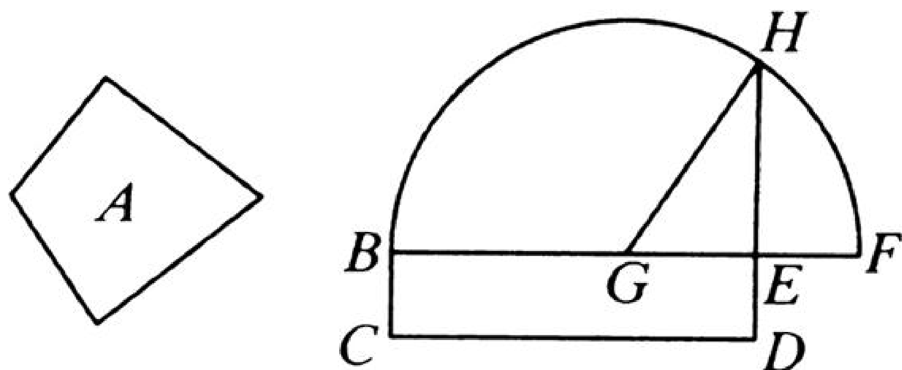
所以：*AC*上的正方形只能比*CB*、*BA*上的正方形的和小*CB*、*BD*所夹的矩形的二倍。

证完。

命题14

…

作一个正方形，面积等于已知的直线形面积。



设：已知直线形*A*，作一个等于直线形面积*A*的正方形。

先设：作了一个等于直线形A的矩形BD。[I. 45]

若BE等于ED，那么因为正方形BD等于直线形A，作图完毕。

如果BE不等于ED，也就是线段BE、ED中有一条较大。

再设：BE较大，且延长至点F。

设EF等于ED，且BF被二等分于点G。

以G为圆心，以GB、GF中的一个为距离画半圆BHF。

将DE延长至H，连接GH。

因为：线段BF被点G二等分，被点E分为不相等的两段，

且由BE、EF围成的矩形与EG上的正方形的和等于GF上的正方形，[II. 5]

又因：GF等于GH，

所以：矩形BE、EF与GE上的正方形的和等于GH上的正方形。

又因：HE、EG上的正方形的和等于GH上的正方形，[I. 47]

所以：矩形BE、EF加上GE上的正方形等于HE、EG上的正方形的和。

以上各边减去GE上的正方形，

那么：剩下的矩形BE、EF等于EH上的正方形。

因为：EF等于ED，所以：矩形BE、EF是BD，

所以：平行四边形BD等于HE上的正方形。

又因：BD等于直线形A，

所以：直线形A等于在EH上作的正方形，

所以：在EH上作了等于已知直线形A的正方形。

作完。

卷III

定义

01 等圆就是直径或半径相等的圆。

02 一条直线与一圆相遇且延长后不与圆相交，就叫作切于一圆。

03 两圆彼此相遇且不相交，叫作彼此相切。

04 当圆心到圆内弦所作的垂线相等时，称这些弦有相等的弦心距。

05 且当垂线较长时，称这弦有较大的弦心距。

06 弓形是由一条弦和一段弧围成的图形。

07 弓形的角是由一条直线和一段圆弧所夹的角。

08 在一段圆弧上取一点，连接这点和这段圆弧的底的两个端点的二直线所夹的角叫作弓形角。

09 而且把这个弓形角叫作张于这段弧上的弓形角。

10 由顶点在圆心的角的两边和这两边所截一段圆弧围成的图形叫作扇形。

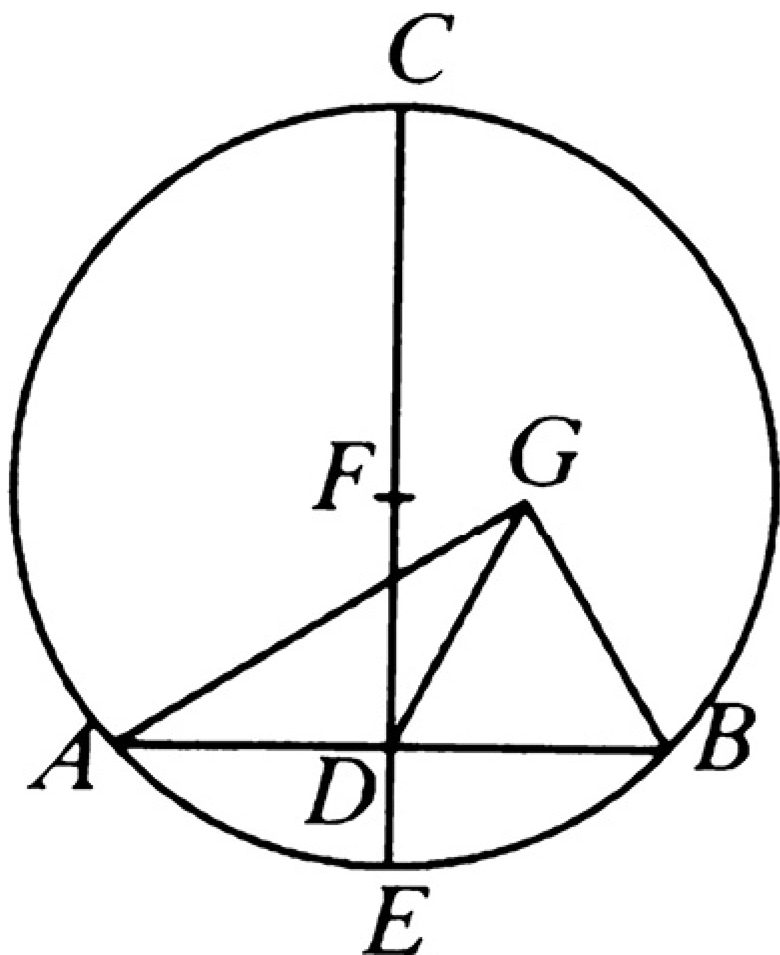
11 相似弓形是那些含相等角的弓形，或者张在它们上的角是彼此相等的。

命题

命题1

…

找出已知圆的圆心。



设：已知圆ABC，现求圆ABC的圆心。

任意作弦AB，作点D二等分AB。

在点D作DC和AB成直角，且设DC经过点E，CE二等分于F。

那么可以说：F就是已知圆ABC的圆心。

设F并非圆心，那么就设G为圆心，连接GA、GD、GB。

因为：AD等于DB，并且DG公用，DG等于DG，

又因：底GA、GB都是半径，

所以：两者相等，

所以：角ADG等于角GDB。[I. 8]

因为：当一条直线和另一条直线所成的邻角彼此相等时，它们每一个都是直角，[I. 定义10]

所以：角GDB是直角。

但是，若角FDB是直角，那么角FDB等于角GDB。大的角等于小的角，这并不符合常理，

所以：G不是圆ABC的圆心。

同理可证：除F外，圆心不会是任何其他的点，

所以：点F是圆ABC的圆心。

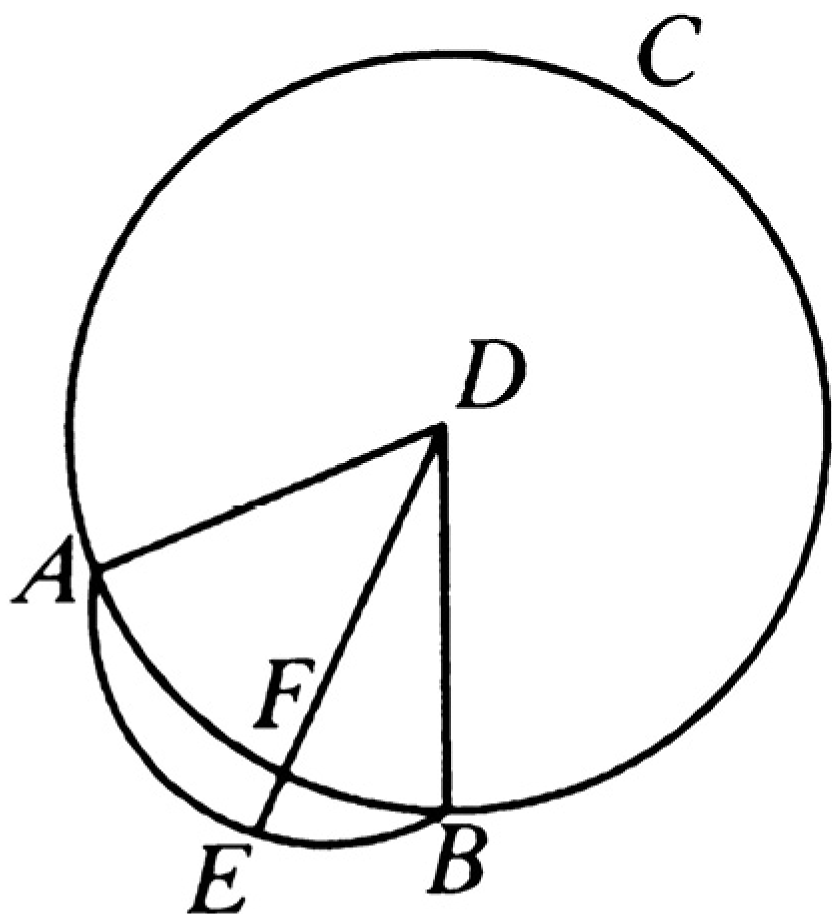
作完。

推论 由此可得：如果一个圆内一条直线把一条弦截成相等的两部分且交成直角，则这个圆的圆心在该直线上。

命题2

…

若在一个圆的圆周上任取两点，那么连接这两点的线段落在圆内。



设：*A*、*B*是圆*ABC*上任取的两点。

那么可以说：从*A*到*B*连成的线段落在圆内。

设：若不落在圆内，则落在圆外，是*AEC*。设圆*ABC*的圆心可以求出。[III. 1]

再设：圆心为*D*，连接*DA*、*DB*，画*DFE*。

因为：*DA*等于*DB*，角*DAE*等于角*DBE*，[I. 5]

并延长三角形*DAE*的一边*AEB*，

所以：角*DEB*大于角*DAE*。[I. 16]

又因：角*DAE*等于角*DBE*，

所以：角DEB大于角DBE，并且大角对的边也大，[I. 19]

故DB大于DE。

又因：DB等于DF，

因此：DF大于DE，小的等于大的，这是不符合常理的，

所以：由A到B连接的线段不可能落在圆外。

同理可证：它也不会落在圆周上，

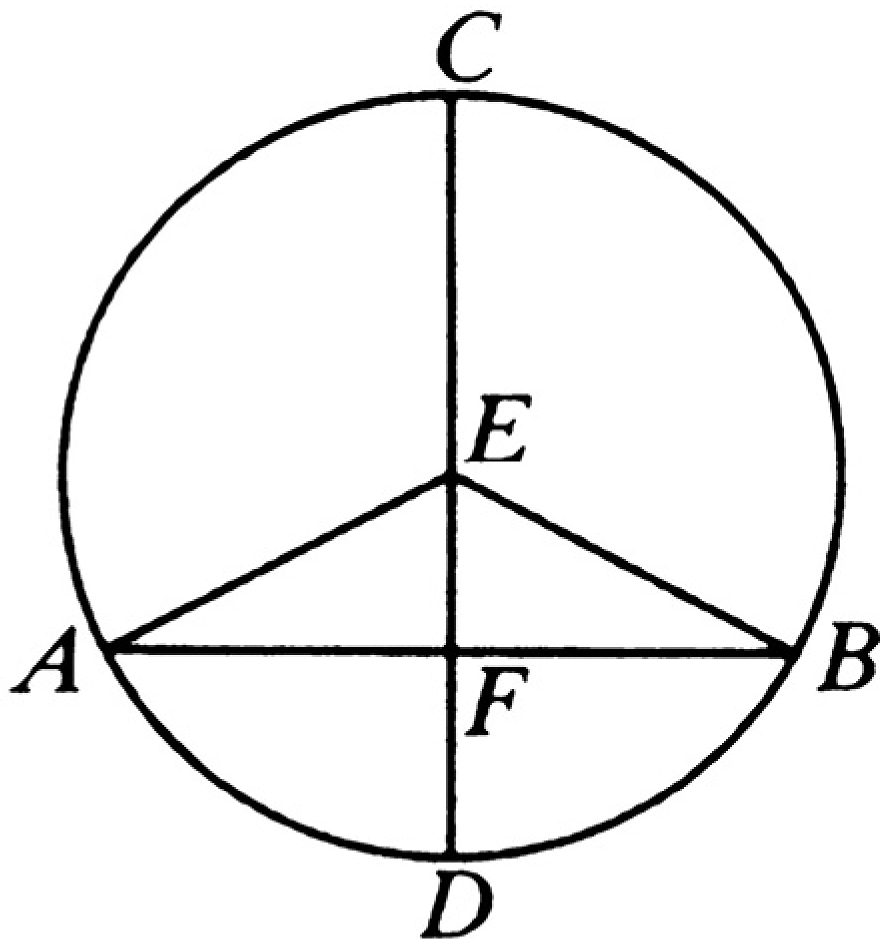
所以：它落在圆内。

证完。

命题3

…

若在一个圆中，一条经过圆心的直线二等分一条不经过圆心的弦，那么它们交成直角；反而言之，如果它们交成直角，那么这条直线二等分这条弦。



设：*ABC*是一个圆，直线*CD*经过圆心且二等分不过圆心的弦*AB*于点*F*。

那么可以说：*CD*与*AB*交成直角。

可求圆*ABC*的圆心。

设：*E*是圆心。连接*EA*、*EB*。

因为：*AF*等于*FB*，并且*FE*是公共的，两边相等；且底*EA*等于底*EB*，

所以：角*AFE*等于角*BFE*。[I. 8]

又因：当一条直线和另一条直线交成两个彼此相等的邻角时，每一个等角都等于直角，[I. 定义10]

所以：角*AFE*、角*BFE*都是直角，

所以：经过圆心的*CD*二等分不过圆心的*AB*时，它们交成直角。

又设：*CD*和*AB*成直角。

那么可以说：*CD*将*AB*二等分，*AF*等于*FB*。

再用上图作，因为*EA*等于*EB*，角*EAF*等于角*EBF*。[I. 5]

又因：直角*AFE*等于直角*BFE*，

所以：*EAF*、*EBF*是两个角相等且有一条边相等的两个三角形，且*EF*是公共的，对着相等的角，

所以：剩下的边等于剩下的边，[I. 26]

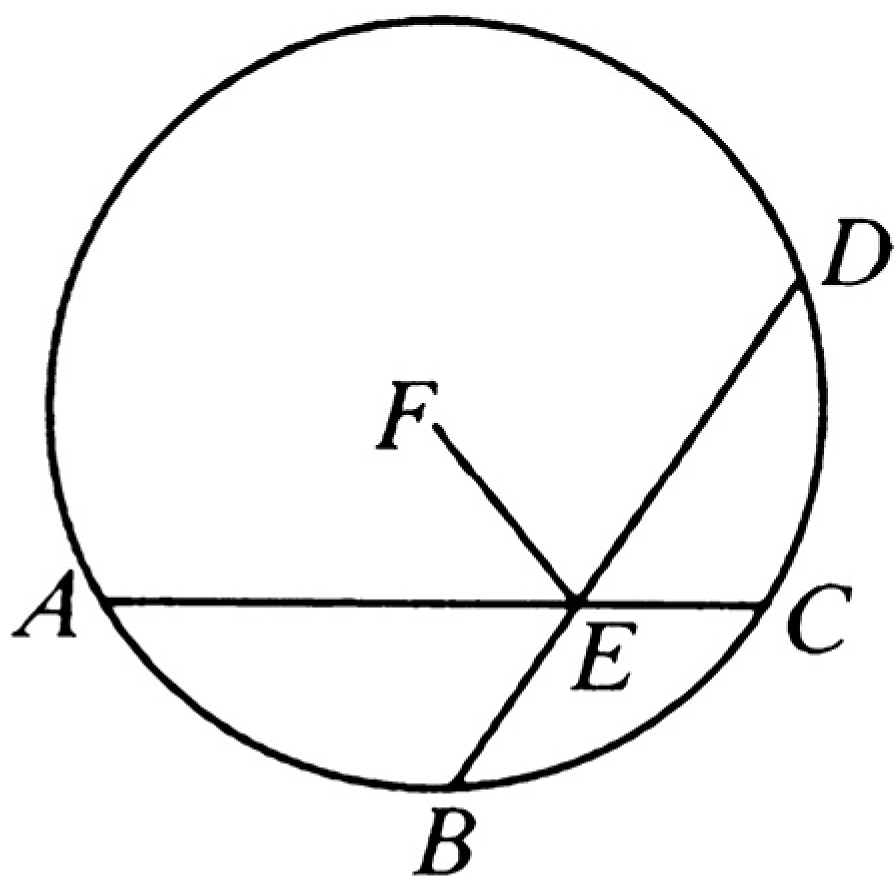
所以：*AF*等于*FB*。

证完。

命题4

…

在一个圆中，若有两条不经过圆心的弦彼此相交，那么它们不互相平分。



设：*ABCD*是一个圆，并且其中有两条弦*AC*、*BD*，不经过圆心，彼此相交于点*E*。

那么可以说：它们彼此不二等分。

设：它们彼此二等分，故*AE*等于*EC*，*BE*等于*ED*。圆*ABCD*的圆心可以求出。[III. 1]

再设：圆心是*F*，连接*FE*。

因为：直线*FE*经过圆心，并二等分不经过圆心的直线*AC*，

那么：它们交成直角，[III. 3]

所以：角*FEA*为直角。

又因：直线*FE*二等分弦*BD*，它们交成直角，[III. 3]

所以：角*FEB*是直角。

又因：已经证明角*FEA*是直角，

所以：角*FEA*等于角*FEB*，小的角等于大的角，这并不符合实际，

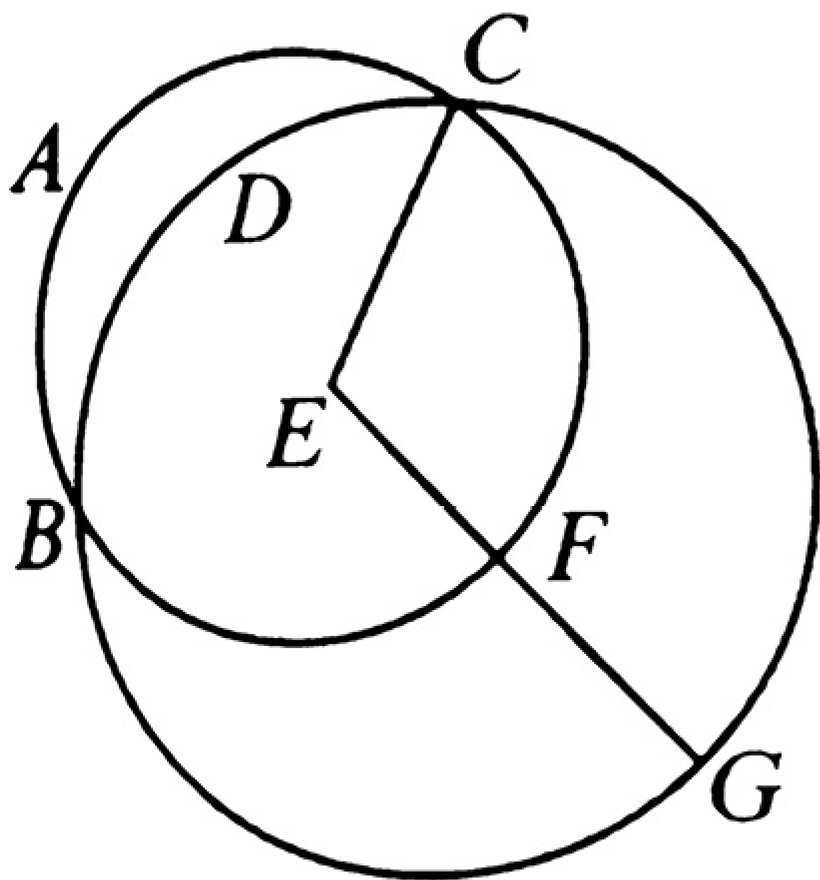
所以：*AC*、*BD*不互相平分。

证完。

命题5

…

若两个圆彼此相交，那么它们不同心。



设：圆ABC、CDG彼此相交于点B、C。

那么可以说：它们不同心。

因为：若两个圆同心，假设圆心为E。连接EC，作任意直线EFG，

因为：点E是圆ABC的圆心，EC等于EG，[I. 定义15]

又因：点E是圆CDG的圆心，EC等于EG，但是，EC已被证明等于EF，所以：EF等于EG，小的等于大的，这并不符合实际，

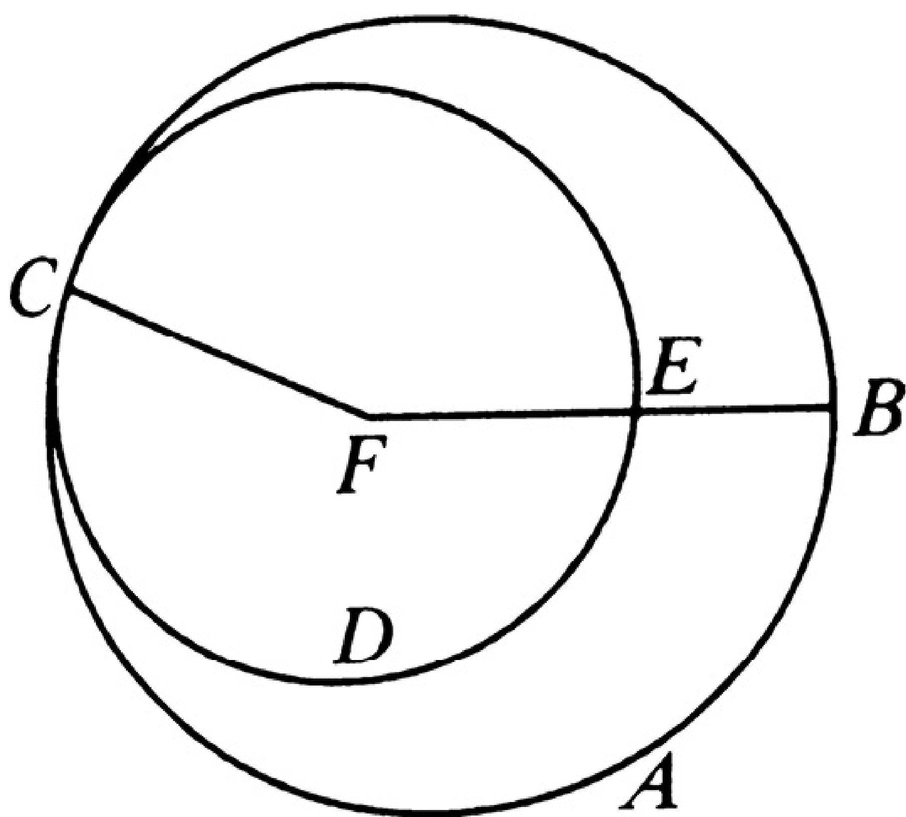
所以：点E不是圆ABC、CDG的圆心。

证完。

命题6

…

若两个圆彼此相切，那么它们不同心。



设：圆*ABC*、*CDE*彼此相切于点*C*。

那么可以说：它们没有共同的圆心。

设：若圆*ABC*、*CDE*有共同的圆心*F*，连接*FC*，并经过*F*任意作*FEB*。

因为：点*F*是圆*ABC*的圆心，*FC*等于*FB*，

又因：点*F*是圆*CDE*的圆心，则*FC*等于*FE*，

并且已经证明*FC*等于*FB*，

所以：*FE*等于*FB*。

小的等于大的，这不符合实际，

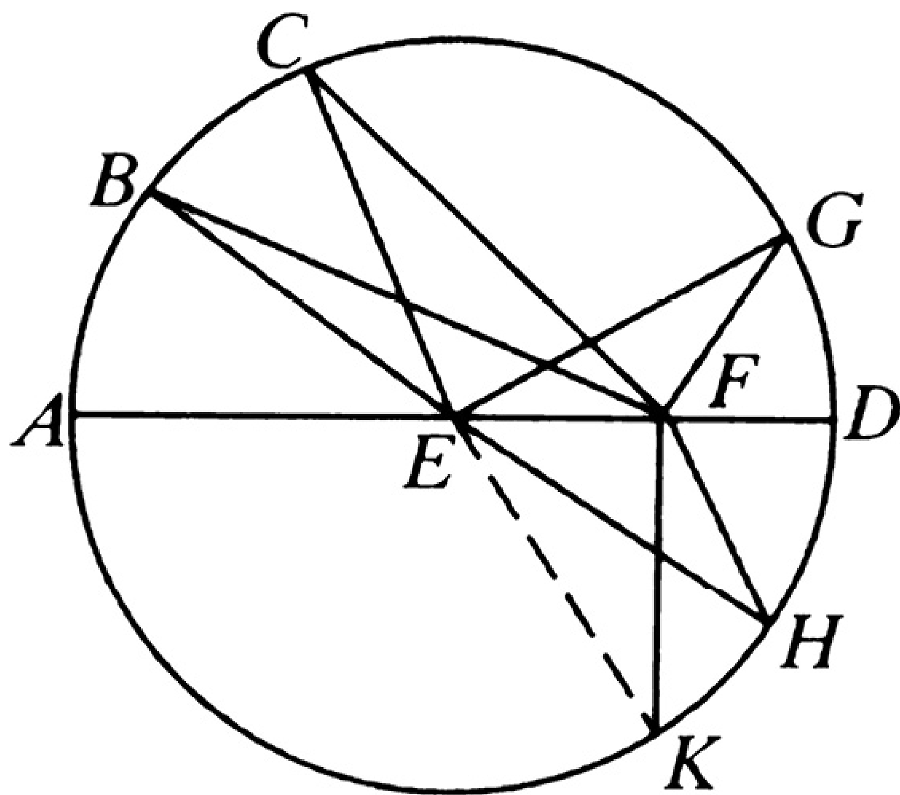
所以：*F*不是圆*ABC*、*CDE*的圆心。

证完。

命题7

…

若在一个圆的直径上取一个不是圆心的点，并且从这个点到圆上所引的线段中，圆心所在的一段最长，同一直径上余下的一段最短；而在其余线段中，靠近过圆心的线段较远离的为长；从这点到圆上可画出相等的线段只有两条，它们各在最短线段的一边。



设：已知圆*ABCD*，*AD*为其直径。在*AD*上取一个不是圆心的点*F*。

又设：*E*为圆心，*FB*、*FC*是由*F*向圆*ABCD*上所引的线段。

那么可以说：*FA*最大，*FD*最小，并且*FB*大于*FC*，*FC*大于*FG*，连接*BE*、*CE*、*GE*。

因为：在任何一个三角形中，两边之和大于第三边，[I. 20]

所以：*EB*、*EF*的和大于*BF*。

又因：*AE*等于*BE*，

因此：*AF*大于*BF*。

因为：*BE*等于*CE*，*FE*是公共的，两边*BE*、*EF*等于两边*CE*、*EF*，

且角*BEF*大于角*CEF*，

所以：底*BF*大于底*CF*。[I. 24]

同理可证：*CF*大于*FG*。

又因：*GF*、*FE*之和大于*EG*，且*EG*等于*ED*；*GF*与*EF*的和大于*ED*，

将以上两边减去*EF*，剩下的*GF*大于剩下的*FD*，

所以：*FA*最大，*FD*最小，并且*FB*大于*FC*，*FC*大于*FG*。

又可证：从点*F*到圆*ABCD*上可画出相等的线段只有两条，它们各在最短线段*FD*的一侧。

在线段*EF*的点*E*上，作角*FEH*等于角*GEF*。[I. 23]

连接*FH*。

因为：*GE*等于*EH*，并且*EF*是公共的，两边*GE*、*EF*等于两边*HE*、*EF*，角*GEF*等于角*HEF*，

所以：底*FC*等于底*FH*。[I. 4]

又可证：从点*F*到圆上再没有等于*FG*的线段。

若有这么条线段，设为*FK*。

因为：*FK*等于*FG*，并且*FH*等于*FG*，*FK*等于*FH*，

那么：离圆心较近的线段等于较远的线段，这是不符合实际的，

所以：从点F引到圆上等于GF的另外的线段是没有的，

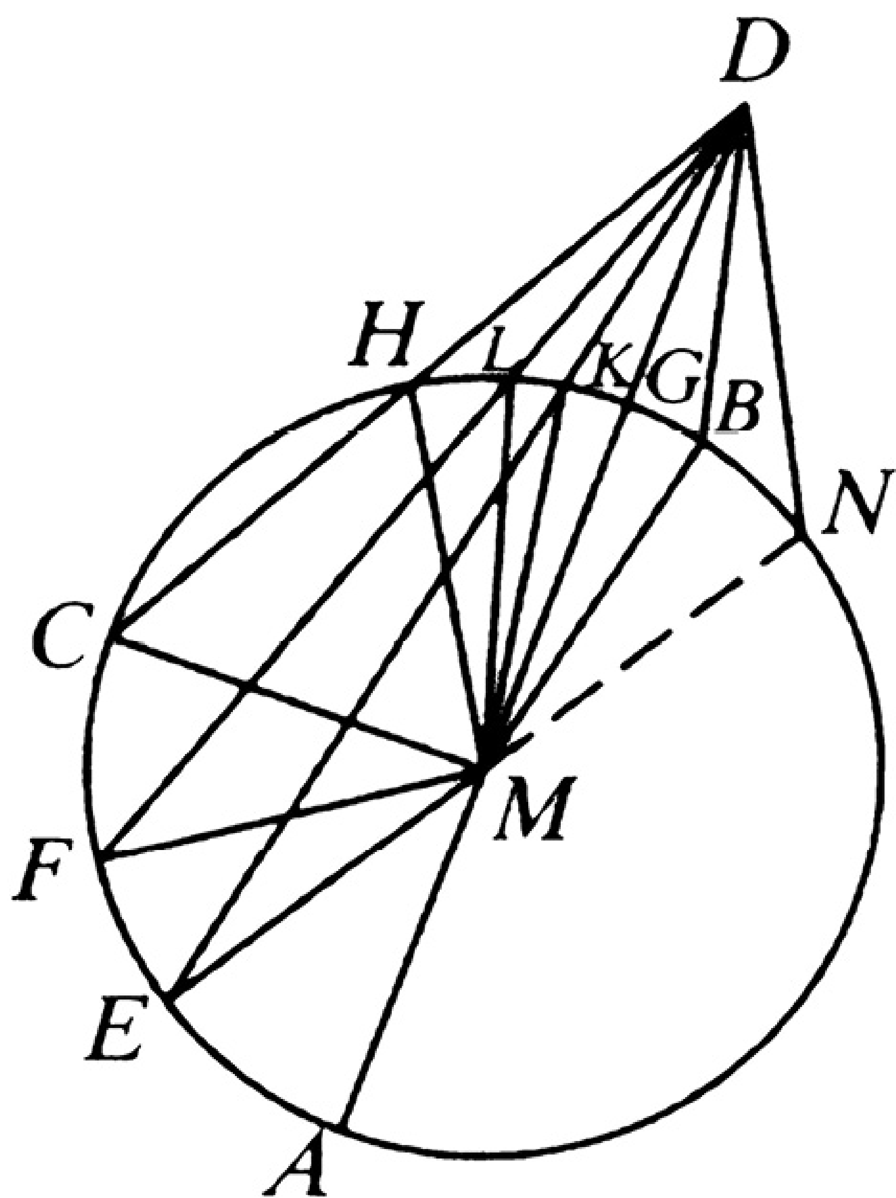
所以：这样的线段只有一条。

证完。

命题8

…

若在圆外取一点，并且从这点画通过圆的直线，其中之一过圆心并且其他的可以任意画出。那么，在凹圆弧的连线中，以经过圆心的最长；这时靠近通过圆心的连线大于远离的连线。但在凸圆弧上的连线中，在取定的点与直径之间的一条最短；这时靠近的连线短于远离的连线。并且由这点到圆周上的连线，相等的连线中只有两条，它们各在最短连线的一侧。



设：*ABC*是一个圆，*D*是圆*ABC*外取定的点，画线段*DA*、*DE*、*DF*、*DC*。其中，*DA*经过圆心。

那么可以说：在凹圆弧*AEFC*上经过圆心的连线*DA*最长，且*DE*大于*DF*，*DF*大于*DC*；但落在凸圆弧*HLKG*上的连线中，在这点与直径*AG*之间的连线*DG*是最短的；并且靠近最短线*DG*的连线小于远离的连线。也就是，*DK*短于*DL*，并且*DL*短于*DH*。

设：圆ABC的圆心[III. 1]为M；

连接ME、MF、MC、MK、ML、MH。

因为：AM等于EM，故将MD加在它们各边，

可以得出：AD等于EM与MD的和。

又因：EM与MD的和大于ED，[I. 20]

所以：AD大于ED。

又因：ME等于MF，且MD是公共的，

所以：EM与MD的和等于FM与MD的和。

又因：角EMD大于角FMD，

所以：底ED大于底FD。[I. 24]

同理可证：FD大于CD，因此DA最大。

又因：DE大于FD，所以DF大于DC，而MK、KD的和大于MD，[I. 21]

且MG等于MK。

所以：剩下的KD大于剩下的GD，

由此，GD小于KD。

因为：在三角形MLD的一边MD上，有两条直线MK、KD相交在三角形内，

因此：MK、KD的和小于ML、LD的和。[I. 21]

且MK等于ML，

因此：剩下的DK小于剩下的DL。

同理可证：DL小于DH，

所以：DG最小，DK小于DL，DL小于DH。

又可证：从点D到圆所连接的相等的两条线段，各在最短的连线DG一边。

在线段MD上取一点M，作角DMB等于角KMD，连接DB。

因为：MK等于MB，并且MD是公共的，两边KM、MD分别等于两边BM、MD。并且角KMD等于角BMD，

所以：底DK等于底DB。[I. 4]

又可证：从点D到圆上再没有另外的连线等于DK。

又如果可行，有那么条连线，设为DN。

因为：DK等于DN，且DK等于DB，DB等于DN，

所以：靠近最短连线DG的等于远离的，这是不符合实际的，

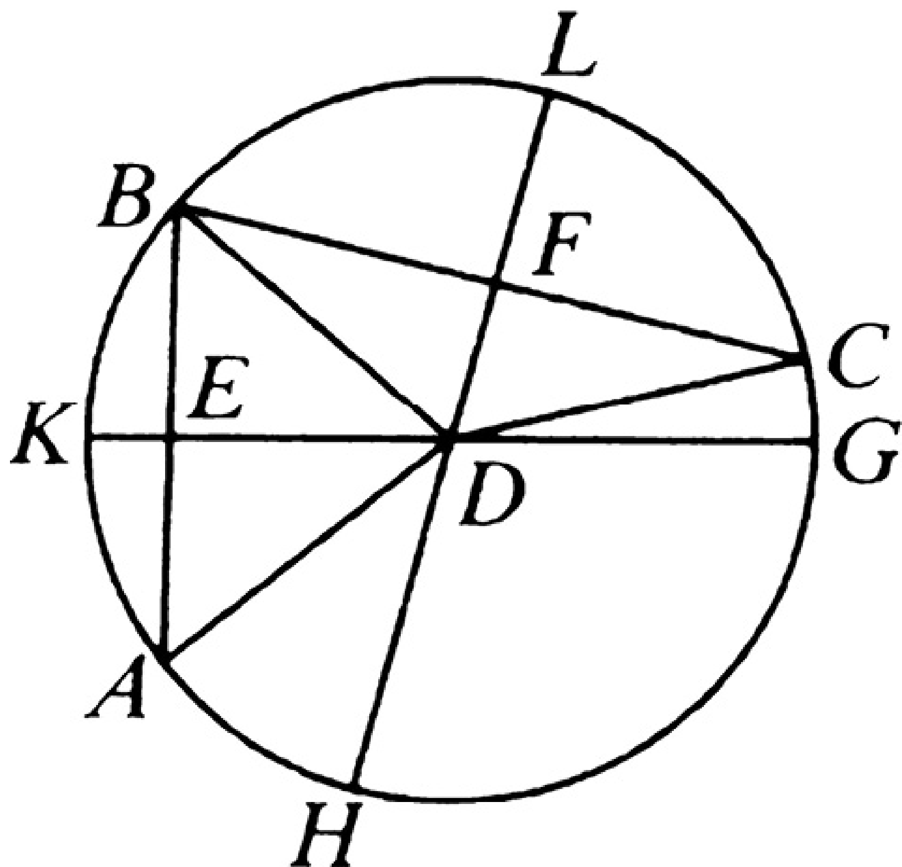
所以：由点D起，落在圆ABC上的相等连线不能多于两条，这两条线段各在最短线DG的一侧。

证完。

命题9

…

若在圆内取一点，从这点到圆上所引相等的线段多于两条。那么这个点是这个圆的圆心。



设：*ABC*是一个圆，*D*是在圆内所取的点，并且从点*D*到圆上可以引多于两条相等的线段，即*DA*、*DB*、*DC*。

那么可以说：*D*就是圆*ABC*的圆心。

这是因为，可连接*AB*、*BC*且平分它们于点*E*、*F*；再连接*ED*、*FD*，让它们经过点*G*、*K*、*H*、*L*。

因为：*AE*等于*EB*，*ED*是公共的，两边*AE*、*ED*等于两边*BE*、*ED*，底*DA*等于底*DB*，

所以：角*AED*等于角*BED*，[I. 8]

所以：角*AED*、*BED*中的每一个都是直角，[I. 定义10]

所以：*GK*将*AB*平分，且成直角。

又因：如果在一个圆内一条直线截另一条线段成相等两部分，且交成直角，那么圆心在前一条直线上，[III. 1，推论]

即圆心在*GK*上。

同理可证：圆*ABC*的圆心也在*HL*上，并且弦*GK*、*HL*除点*D*以外再没有公共点，

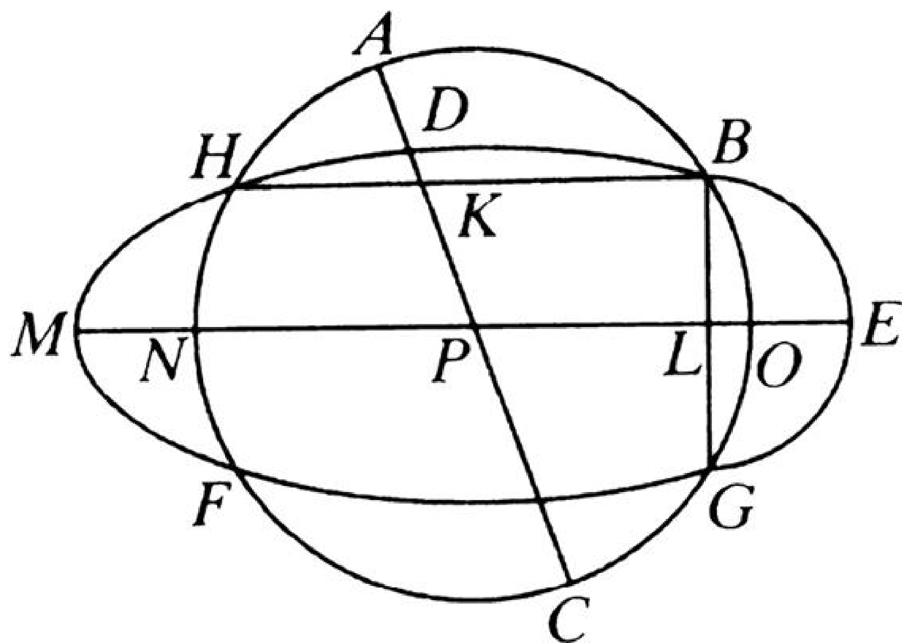
所以：点*D*是圆*ABC*的圆心。

证完。

命题10

…

一个圆截另一个圆，其交点不多于两个。



设：圆*ABC*截圆*DEF*其交点多于两个，分别为*B*、*G*、*F*、*H*四个点。

连接*BH*、*BG*，且平分它们于点*K*、*L*，又由*K*、*L*作*KC*、*LM*和*BH*、

*BG*成直角，且使其通过点*A*、*E*。

因为：在圆*ABC*内一条弦*AC*截另一条弦*BH*成相等两部分且成直角，

所以：圆*ABC*的圆心就在*AC*上。[III. 1，推论]

又因：在同一圆*ABC*中，弦*NO*截弦*BG*成相等两部分，且成直角，

所以：圆*ABC*的圆心在*NO*上。

因为：已经证明圆心在*AC*上，并且弦*AC*、*NO*除点*P*外不再有交点，

所以：点*P*是圆*ABC*的圆心。

同理可证：点*P*也是圆*DEF*的圆心，

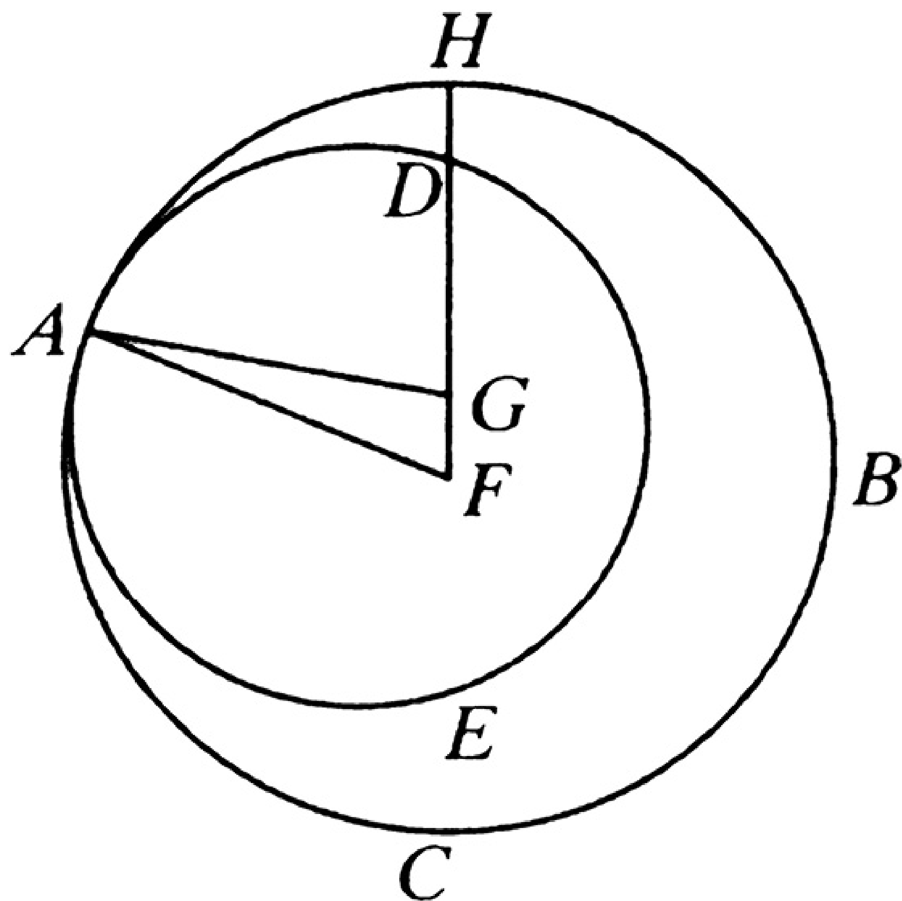
所以：两个圆*ABC*、*DEF*彼此相截时有一个共同的圆心*P*，这是不符合实际的。[III. 5]

证完。

命题11

…

若两个圆互相内切，又给定它们的圆心，用线段连接两个圆心，若是延长这条线段，那么必过两圆的切点。



设：两圆*ABC*、*ADE*相互内切于点*A*，且给定圆*ABC*的圆心为*F*，*ADE*的圆心为*G*。

那么可以说：连接*G*、*F*的直线必过点*A*。

这是因为，假设不是这样，可设连线为*FGH*，且连接*AF*、*AG*。

因为：*AG*、*GF*的和大于*FA*，即大于*FH*，

从以上各边减去*FG*，那么剩下的*AG*大于剩下的*GH*，

又因：*AG*等于*GD*，

所以：*GD*大于*GH*。

小的大于大的，这是不符合实际的，

所以：F与G的连线不能落在FA的外边，

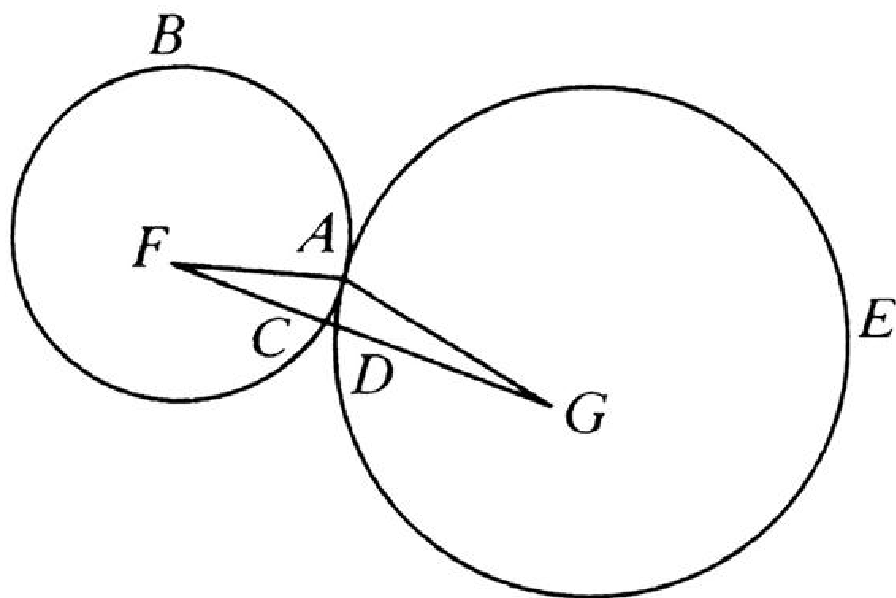
所以：它一定经过切点A。

证完。

命题12

…

假如两个圆互相外切，那么它们的圆心的连线通过切点。



设：两圆ABC、ADE相互外切于点A，并且给定圆ABC的圆心为F，ADE的圆心为G。

那么可以说：F与G的连线通过切点A。

如果F与G的连线通过切点A。

这是因为，假设不是这样，可设它通过$FCDG$，连接AF、AG。

因为：点F是圆ABC的圆心，FA等于FC，

又因：点G是圆ADE的圆心，GA等于GD，

且已经证明FA等于FC，

且FA、AG的和等于FC、GD的和，

所以：整体的FG大于FA、AG的和，但小于它们的和。[I. 20]

这是不符合实际的。

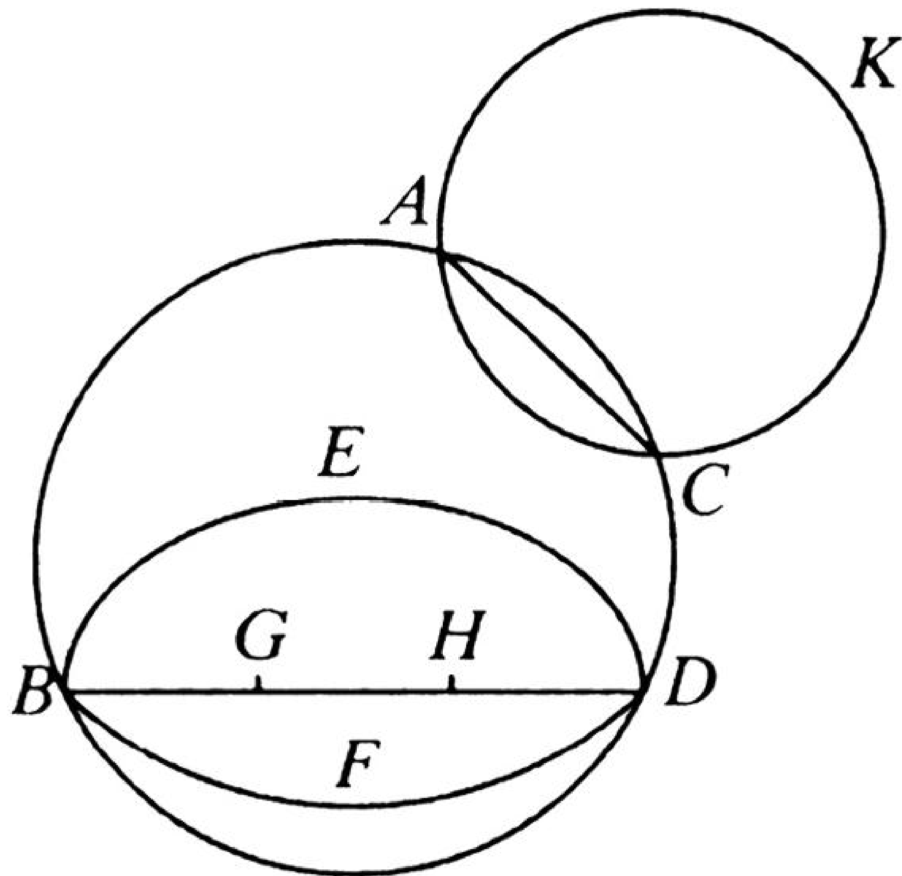
所以：从F到G的连线不会不经过切点A，也就是它一定会经过A。

证完。

命题13

…

一个圆和另一个圆无论是内切或是外切，其切点不多于一个。



这是因为，如果可能，设：圆*ABDC*与圆*EBFD*相切，切点多于一个，也就是*D*、*B*。先假设它们内切。

又设：圆*ABDC*的圆心是*G*，*EBFD*的圆心是*H*。

连接从*G*到*H*的直线通过*B*、*D*。[III. 11]

设其为*BGHD*。

因为：点*G*是圆*ABCD*的圆心，*BG*等于*GD*，

所以：*BG*大于*HD*，

故，*BH*比*HD*更大。

因为：点*H*是圆*EBFD*的圆心，*BH*等于*HD*，

又因：已经证明BH比HD更大，这是不符合实际的，

所以：一个圆和另外一个圆内切时，切点不多于一个。

进一步可证，外切时，切点也不会多于一个。

这是因为，如果可能，设：圆ACK与圆$ABDC$的切点多于一个，也就是A、C，连接AC。

又因：圆$ABDC$、ACK每个的圆周上已经任意取定了两个点A与C。它们的连线将落在每个圆的内部，[III. 2]

但是，它落在圆$ABDC$内部，并且落在圆ACK的外部，[III. 定义3]

这是不符合实际的。

所以：一个圆与另一个圆外切时，切点不多于一个，

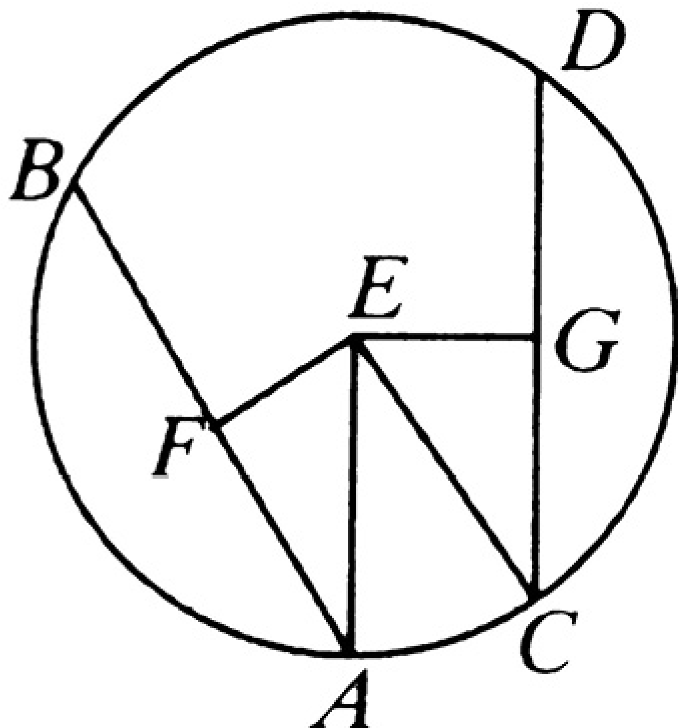
且已证明，内切时也不可能。

证完。

命题14

…

在一个圆中等弦的弦心距也相等；反之，弦心距相等，则弦也彼此相等。



设：*ABDC*是一个圆，*AB*、*CD*是圆中相等的弦。

那么可以说：*AB*、*CD*的弦心距相等。

这是因为，设：圆*ABDC*的圆心已定。[III. 1]

设：圆心是*E*，从*E*向*AB*、*CD*作垂线*EF*、*EG*；连接*AE*、*EC*。

因为：通过圆心的直线*EF*交不经过圆心的直线*AB*成直角，并二等分*AB*，[III. 3]

所以：*AF*等于*FB*，故，*AB*是*AF*的二倍。

同理可证：*CD*也是*CG*的二倍，又因*AB*等于*CD*，

因此：*AF*等于*CG*。

因为：*AE*等于*EC*，*AE*上的正方形等于*EC*上的正方形，

又因：在*F*处的是直角，

所以：AF、EF上的正方形的和等于AE上的正方形。

又因：在G处的是直角，

所以：EG、GC上的正方形的和等于EC上的正方形。

所以：在AF、FE上的正方形的和等于CG、GE上的正方形的和。

又因：AF上的正方形等于CG上的正方形，这是因为AF等于CG，

所以：剩下的FE上的正方形等于EG上的正方形，

所以：EF等于EG。

但当弦心距相等时，这些弦叫作有相等弦心距的弦，[III. 定义4]

所以：AB、CD的弦心距相等。

又设：弦AB、CD有相等的弦心距，即EF等于EG。

那么可以说：AB等于CD。

这是因为，用同样的作图，类似地可以证明：AB是AF的二倍，CD是CG的二倍。

又因：AE等于CE，AE上的正方形等于CE上的正方形，

但EF、FA上的正方形的和等于AE上的正方形；并且EG、GC上的正方形的和等于CE上的正方形。[I. 47]

所以：EF、FA上的正方形的和等于EG、GC上的正方形的和。

又因：EF等于EG，

所以：EF上的正方形等于EG上的正方形，

所以：剩下的AF上的正方形等于CG上的正方形，

所以：AF等于CG。

又因：AB是AF二倍，CD是CG二倍，

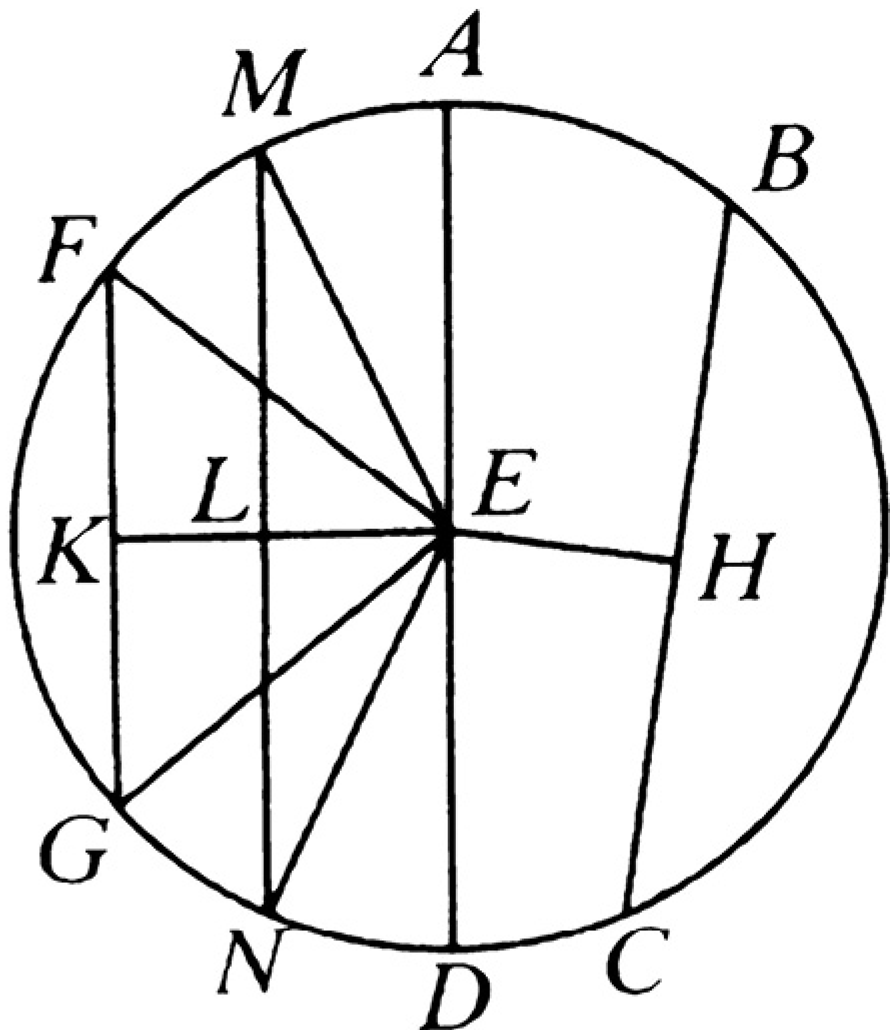
所以：AB等于CD。

证完。

命题15

…

在一个圆中的弦以直径最长，而且越靠近圆心的弦总是大于远离圆心的弦。



设：*ABCD*是一个圆，*AD*是直径，*E*为圆心；

又设：*BC*靠近直径*AD*，且*FG*较远。

那么可以说：*AD*最长，*BC*大于*FG*。

由圆心*E*向*BC*、*FG*作垂线*EH*、*EK*。

因为：*BC*是靠近圆心且*FG*是远离圆心的，*EK*大于*EH*，[III. 定义5]

取*EL*使它经过*EH*，过*L*作*LM*使它和*EK*成直角且经过点*N*；连接*ME*、*EN*、*FE*、*EG*。

因为：*EH*等于*EL*，*BC*等于*MN*，[III. 14]

又因：*AE*等于*EM*，*ED*等于*EN*，*AD*等于*ME*与*EN*的和，

但*ME*、*EN*的和大于*MN*，[I. 20]

又因：*MN*等于*BC*，

所以：*AD*大于*BC*。

因为：两边*ME*、*EN*的和等于两边*FE*、*EG*的和，且角*MEN*大于角*FEG*，

所以：底*MN*大于底*FG*。[I. 24]

又因：已经证明*MN*等于*BC*，

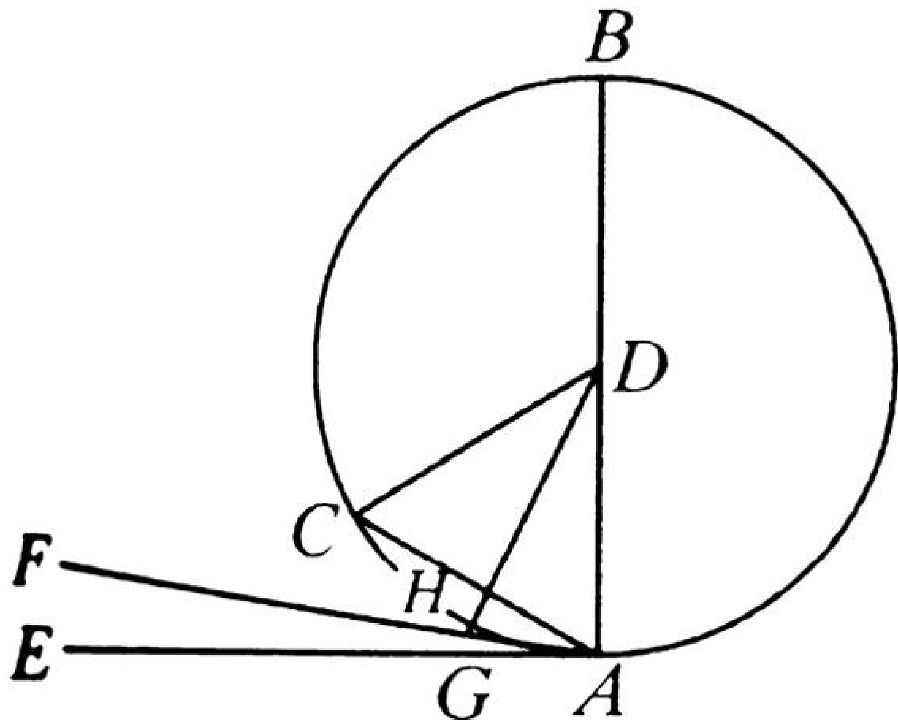
所以：直径*AD*最大，*BC*大于*FG*。

证完。

命题16

…

从一个圆的直径的端点作直线与直径成直角，那么该直线落在圆外，又在这个平面上且在这直线与圆周之间不能再插入其他的直线；并且半圆角大于任何锐直线角，而余下的角小于任何锐直线角。



设：*ABC*是一个圆，*D*为圆心，*AB*为直径。

那么可以说：从*AB*的端点*A*作与*AB*成直角的直线落在圆外。

这是因为，假设是不这样，但如果可设：它是*CA*且落在圆内，连接*DC*。

因为：*DA*等于*DC*，角*DAC*等于角*ACD*，[I. 5]

又因：角*DAC*是直角，

所以：角*ACD*也是直角。这样，在三角形*ACD*中，角*DAC*、*ACD*的和等于两直角，这是不符合实际的，[I. 17]

所以：从点*A*作直线与*BA*成直角时，这条直线不能落在圆内。

同理可证：这样的直线也绝对不能落在圆周上，只能落在圆外。

设：它落在*AE*处。

接着，可以证明：在这个平面上，在直线*AE*和圆周*CHA*之间不能再插入其他直线。

这是因为，如果可能，设：插入的直线是*FA*，由点*D*作*DG*垂直于*FA*。

因为：角*AGD*是直角，角*DAG*小于直角，

所以：*AD*大于*DG*，[I. 19]

但*DA*等于*DH*，因此：*DH*大于*DG*，

小的大于大的，这是不符合实际的，

所以：在这个平面上，不能在直线与圆周之间再插入其他的直线。

进一步可证：弦*BA*与圆周*CHA*所夹的半圆角大于任何锐直线角，而余下的由圆周*CHA*与直线*AE*所包含的角小于任何锐直线角。

因为：若有某一直线角大于由直线*BA*与圆弧*CHA*包含的角，并且某一直线角小于由圆周*CHA*与直线*AE*包含的角，

那么：在平面内，在圆弧与直线*AE*之间可以插入这么一个角，它由直线包含，且大于由直线*BA*和圆弧*CHA*包含的角，并且与直线*AE*包含的其他的角都小于由圆弧*CHA*与直线*AE*包含的角。

但这样的直线无法插入。

所以：没有由直线所夹的任何锐角大于由弦*BA*与圆弧*CHA*包含的角；也没有由直线所夹的任何锐角小于由圆弧*CHA*与直线*AE*所夹的角。

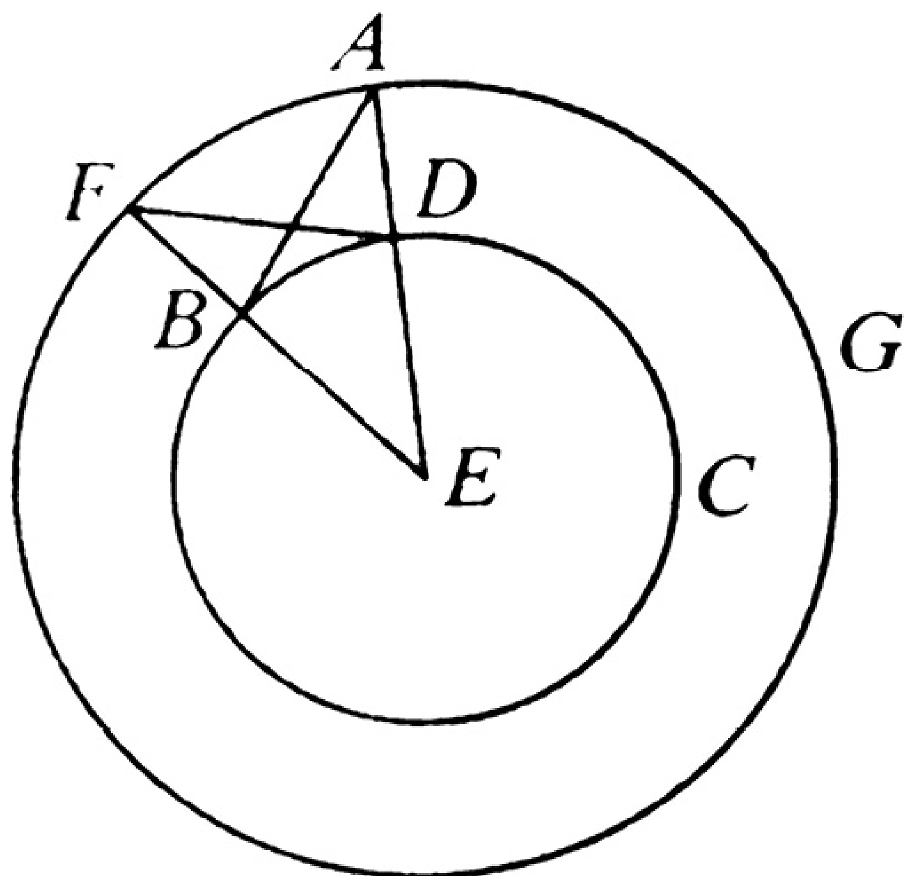
证完。

推论 由此可得，由圆的直径的端点作和它成直角的直线切于此圆。

命题17

…

由给定的点作直线切于已知圆。



设：*A*是已给定的点，*BCD*是已知圆。

要求由点*A*作一直线切于圆*BCD*。

设：圆心为*E*。[III. 1]

连接*AE*，用圆心*E*和距离*EA*画圆*AFG*，由*D*作*DF*和*EA*成直角，连接*EF*、*AB*。

那么可以说：由点*A*作的*AB*是切于圆*BCD*的。

因为：*E*是圆*BCD*、*AFG*的圆心，*EA*等于*EF*，并且*ED*等于*EB*，

所以：两边*AE*、*EB*等于两边*FE*、*ED*，并且它们包含在点*E*处的公共

角，

所以：底*DF*等于底*AB*，三角形*DEF*全等于三角形*BEA*，

其余的角等于其余的角，[I. 4]

所以：角*EDF*等于角*EBA*。

又因：角*EDF*是直角，因此：角*EBA*也是直角，

现在，*EB*是半径，

而由圆的直径的端点所作的直线和直径成直角，那么直线切于圆，[III. 16，推论]

所以：*AB*切于圆*BCD*，

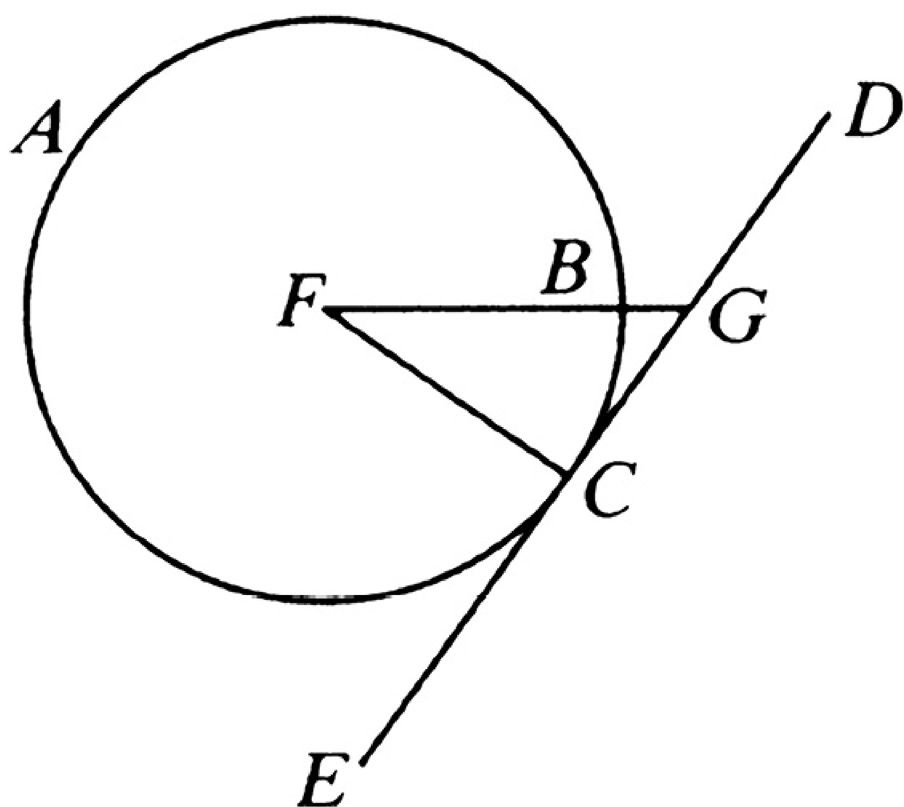
所以：从给定的点*A*作了圆*BCD*的切线*AB*。

作完。

命题18

…

若一条直线切于一个圆，那么圆心到切点的连线垂直于切线。



设：直线DE与圆ABC相切于点C，点F为圆ABC的圆心，由F到C的连线为FC。

那么可以说：FC垂直于DE。

这是因为，如果不垂直，设：由F作垂直于DE的直线FG。

因为：角FGC是直角，角FCG是锐角，[I. 17]

且较大的角所对的边也较大。

所以：FC大于FG。

又因：FC等于FB，

所以：FB大于FG。

小的大于大的，这是不符合实际的，

所以：FG不垂直于DE。

同理可证：除了FC外，没有其他的直线垂直于DE，

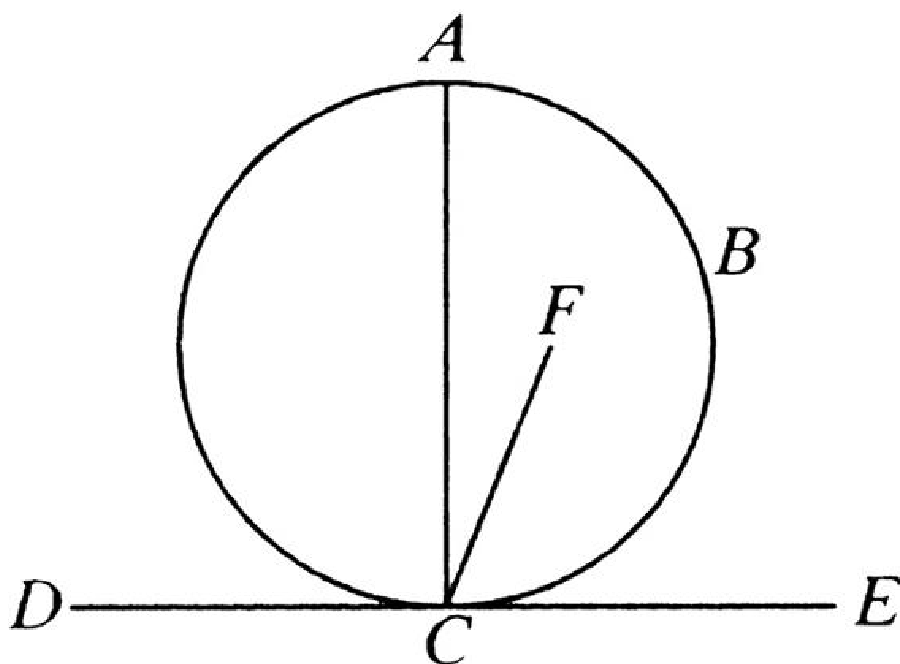
所以：FC垂直于DE。

证完。

命题19

…

若一条直线切于一个圆，并且从切点作一条与切线成直角的直线，那么圆心就在这条直线上。



设：直线DE切圆ABC于点C，并且从C作CA与DE成直角。

那么可以说：圆心在AC上。

这是因为，假设不是这样，但如果可设：F为圆心，连接CF。

因为：直线DE切于圆ABC，并且FC是由圆心到切点的连线，FC垂直于DE，[III. 18]

所以：角FCE是直角。

又因：角ACE也是直角，

所以：角FCE等于角ACE，小角等于大角，这是不符合实际的，

所以：F不是圆ABC的圆心。

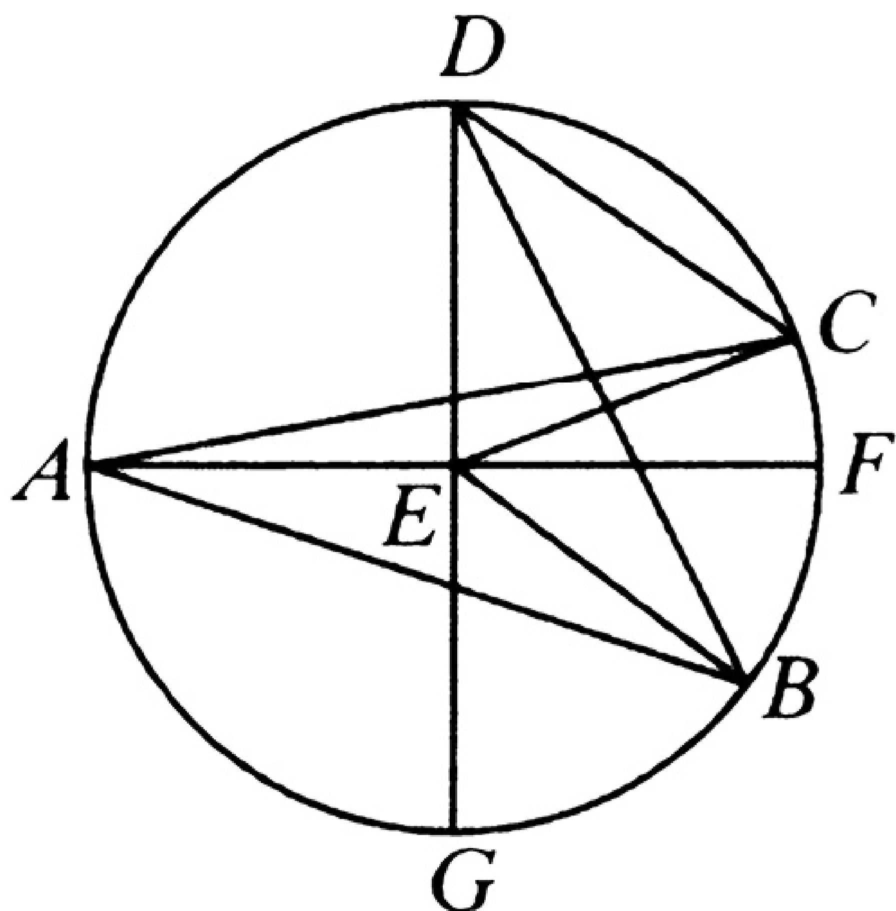
同理可证：除圆心在AC上外，不可能是其他的点。

证完。

命题20

…

在一个圆内，同弧上的圆心角等于圆周角的二倍。



设：*ABC*是一个圆，角*BEC*是圆心角，角*BAC*是圆周角，它们有一个以*BC*为底的弧。

那么可以说：角*BEC*是角*BAC*的二倍。连接*AE*，经过*F*。

因为：*EA*等于*EB*，角*EAB*等于*EBA*，[I. 5]

所以：角*EAB*、*EBA*的和是角*EAB*的二倍。

又因：角*BEF*等于角*EAB*与*EBA*的和，[I. 32]

所以：角*BEF*也是角*EAB*的二倍。

同理可证：角*FEC*也是角*EAC*的二倍，

所以：整个角*BEC*是整体角*BAC*的二倍。

又，移动另外的直线，就有另一个角*BDC*；连接*DE*，延长到*G*；

同理可证：角*GEC*是角*EDC*的二倍，角*GEB*是角*EDB*的二倍，

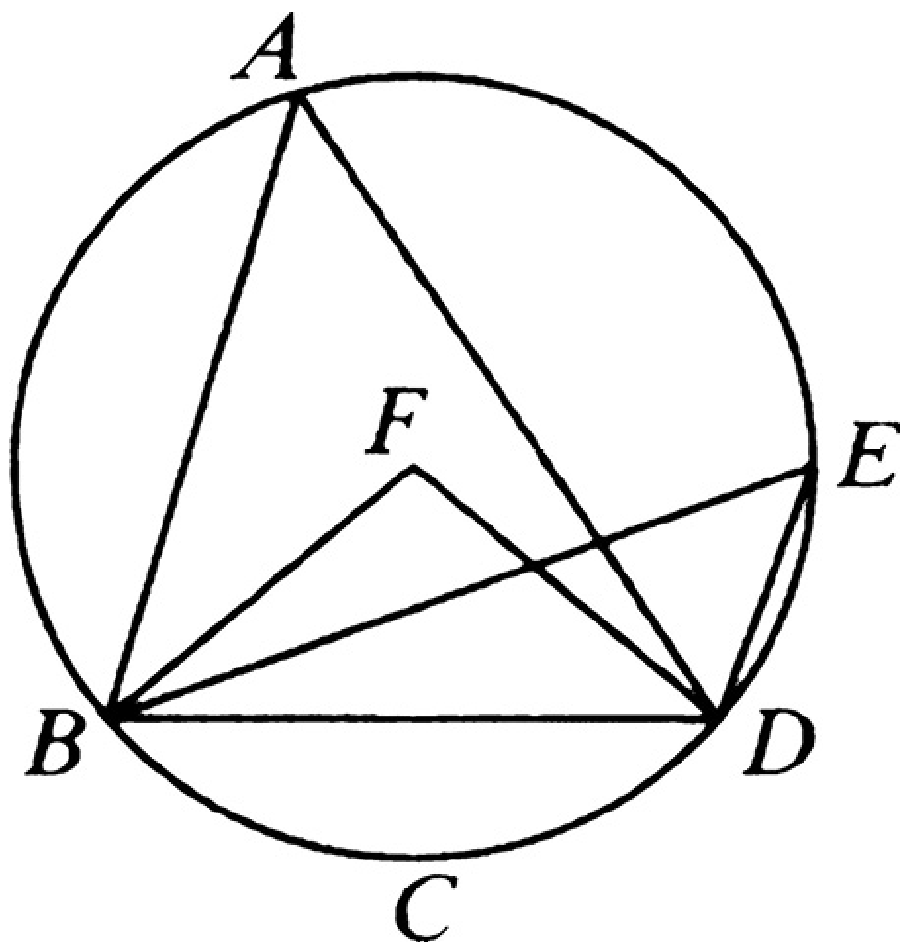
所以：剩下的角*BEC*是角*BDC*的二倍。

证完。

命题21

…

在同一个圆中，同一弓形上的角是彼此相等的。



设：*ABCD*是一个圆，令角*BAD*与角*BED*是同一弓形*BAED*上的角。

那么可以说：角*BAD*与角*BED*相等。

这是因为，假设圆*ABCD*的圆心为*F*，连接*BE*、*FD*。

因为：角*BFD*的顶点在圆心上，并且角*BAD*的顶点在圆周上，它们以相同的弧*BCD*为底，

所以：角*BFD*是角*BAD*的二倍。[III. 20]

同理可证：角*BFD*也是角*BED*的二倍，

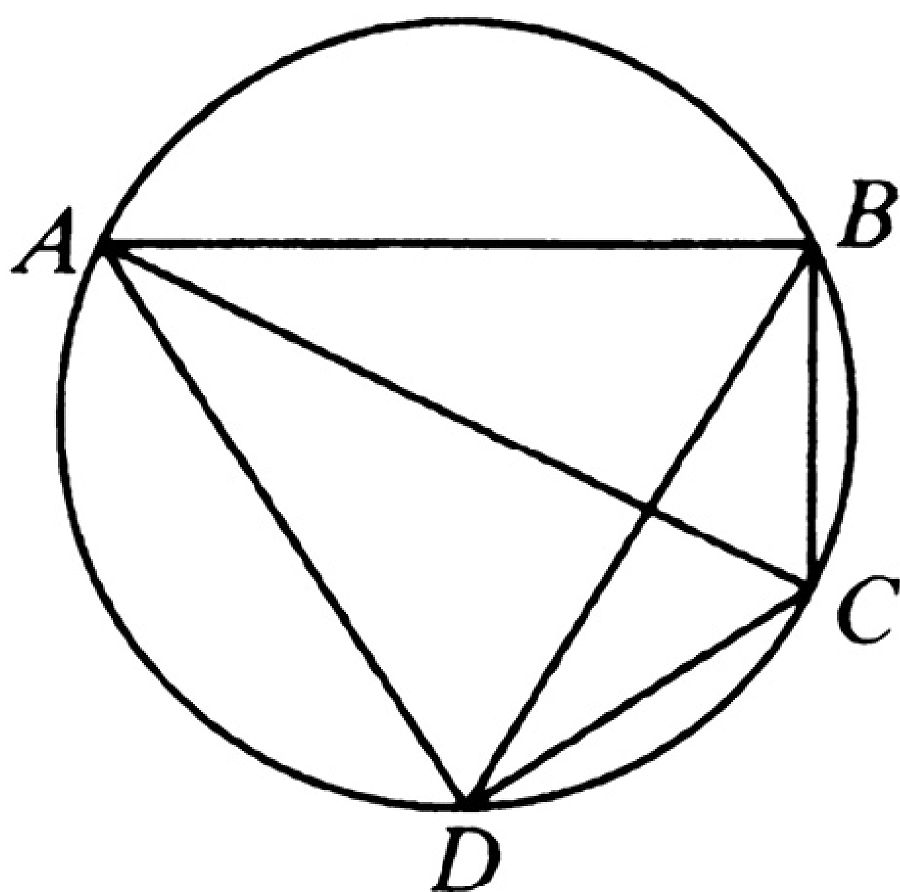
所以：角*BAD*等于角*BED*。

证完。

命题22

…

内接于圆的四边形其对角的和等于两直角。



设：*ABCD*是一个圆，*ABCD*是其内接四边形。

那么可以说：其对角的和等于两直角。

连接*AC*、*BD*。

因为：在任意三角形中，三个角的和等于两直角，[I. 32]

三角形*ABC*的三个角分别为角*CAB*、*ABC*、*BCA*的和等于两直角，

又因：角*CAB*、角*BDC*在同一弓形*BADC*上，

所以：角*CAB*等于角*BDC*。[III. 21]

因为：角*ACB*、角*ADB*在同一弓形*ADCB*上，

所以：角*ACB*等于角*ADB*，

所以：整体角*ADC*等于角*BAC*与角*ACB*的和。

将角*ABC*加在以上两边，

那么：角*ABC*、*BAC*、*ACB*的和等于角*ABC*与角*ADC*的和。

因为：角*ABC*、*BAC*、*ACB*的和等于两直角，

所以：角*ABC*与角*ADC*的和等于两直角。

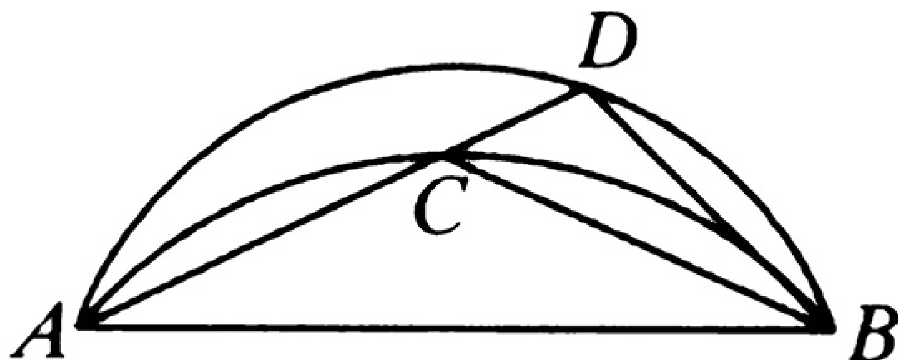
同理可证：角*BAD*、*DCB*的和等于两直角。

证完。

命题23

…

在同一线段上且在同一侧不能作两个相似且不相等的弓形。



这是因为，如果可能，设：在同一线段*AB*的同侧可以作两个相似且不相等的弓形*ACB*、*ADB*。

作*ACD*与二弓形相交，连接*CB*、*DB*。

因为：弓形*ACB*相似于弓形*ADB*，

又因：相似的弓形有相等的角，[III. 定义11]

所以：角ACB等于角ADB，也就是外角等于内对角，这是不符合实际的。[I. 16]

证完。

命题24

…

在相等线段上的相似弓形是相等的。



设：AEB、CFD是相等线段AB、CD上的相似弓形。

那么可以说：弓形AEB等于弓形CFD。

将弓形AEB移动到CFD；

若点A落在C上以及AB落在CD，点B也将与点D重合。

这是因为，AB等于CD，且AB与CD重合，

所以：弓形AEB重合于弓形CFD。

若线段AB与CD重合，但弓形AEB不与弓形CFD重合，

它或者落在里面，或者落在外面，或者落在CGD的位置，

那么：一个圆与另一个圆的交点多于两个，这是不符合实际的，[III. 10]

所以：若线段AB移至CD，弓形AEB也必定与弓形CFD重合，

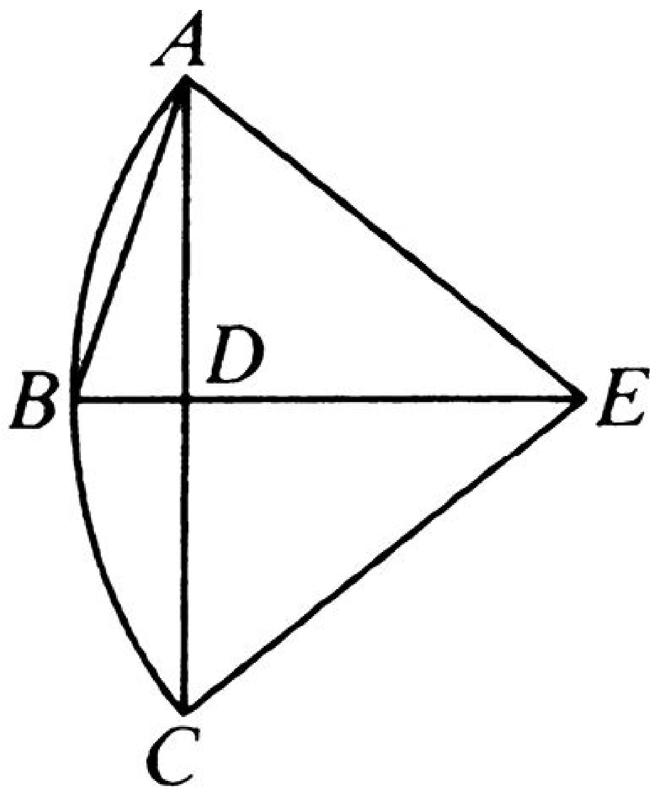
所以：两个弓形互相重合，因此是相等的。

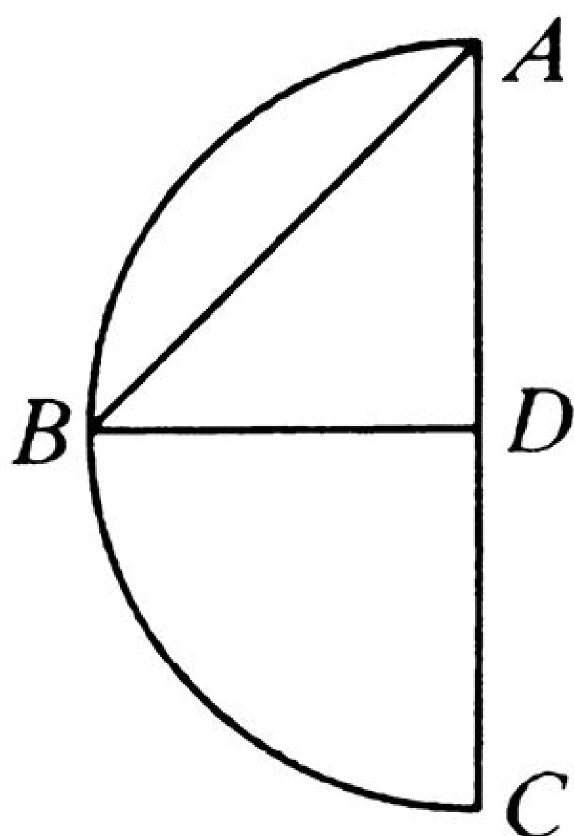
证完。

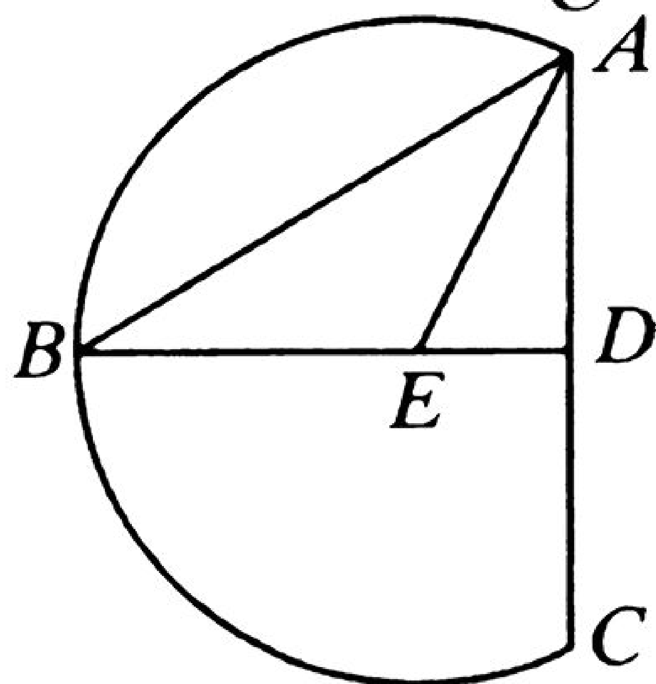
命题25

…

已知一个弓形，求作一个整圆，使其弓形为它的一个截段。




A
B
D
C


A
B
D
E
C

设：*ABC*是已给定的弓形，求作一个整圆，使弓形*ABC*是圆的一个截段。

设：点*D*将*AC*二等分，从点*D*作*DB*和*AC*成直角。连接*AB*。

那么：角*ABD*大于、等于或小于角*BAD*。

先设：角*ABD*大于角*BAD*，且在直线*BA*上的点*A*处作角*BAE*等于角*ABD*，延长*DB*到点*E*。连接*EC*。

因为：角*ABE*等于角*BAE*，线段*EB*等于*EA*，[I. 6]

又因：*AD*等于*DC*，*DE*是公共的，

两边*AD*、*DE*分别等于两边*CD*、*DE*。角*ADE*等于角*CDE*，因为每一个都是直角，

所以：底*AE*等于底*CE*。

又因：已经证明*AE*等于*BE*，

所以：*BE*等于*CE*，

所以：三条线段*AE*、*EB*、*EC*彼此相等，

所以：以*E*为圆心，以线段*AE*、*EB*、*EC*之一为距离所画的圆，是可经过其余点而得的整圆，[III. 9]

因此：已知一个弓形，可作整圆。

又因：圆心*E*在弓形*ABC*外，

所以：弓形*ABC*小于半圆。

同理可证：如果角*ABD*等于角*BAD*，*AD*等于*BD*、*DC*的每一个。三条线段*DA*、*DB*、*DC*彼此相等，*D*是整圆的圆心。

那么显而易见，弓形*ABC*是一个半圆。

但若角*ABD*小于角*BAD*，且在*BA*上*A*点处作一个角等于*ABD*，圆心落在*DB*上，同时也在弓形*ABC*内，

那么显而易见，弓形*ABC*大于半圆，

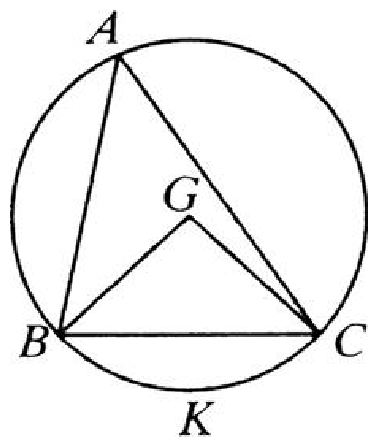
所以：给定一个圆的一个弓形，它所在的整圆就可以画出。

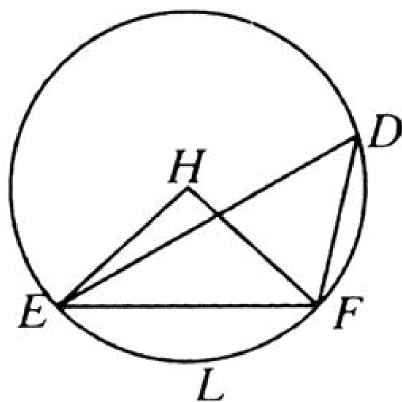
作完。

命题26

…

等圆内相等的圆心角或者圆周角所对的弧也是彼此相等的。





设：*ABC*、*DEF*是相等的圆，它们的圆心角*BGC*、*EHF*相等；圆周角*BAC*、*EDF*相等。

那么可以说：弧*BKC*等于弧*ELF*。

连接*BC*、*EF*。

因为：圆*ABC*、*DEF*相等，它们的半径也相等，

所以：线段*BG*等于*EH*，线段*GC*等于*HF*，且*G*处的角等于*H*处的角，

所以：底BC等于底EF。[I. 4]

因为：A处的角等于D处的角，弓形BAC与弓形EDF相似，[III. 定义11]

且弓形BAC与弓形EDF是在相等的线段上，

又因：相等线段上的相似弓形彼此相等，[III. 24]

所以：弓形BAC等于弓形EDF。

又因：整体圆ABC等于整体圆DEF，

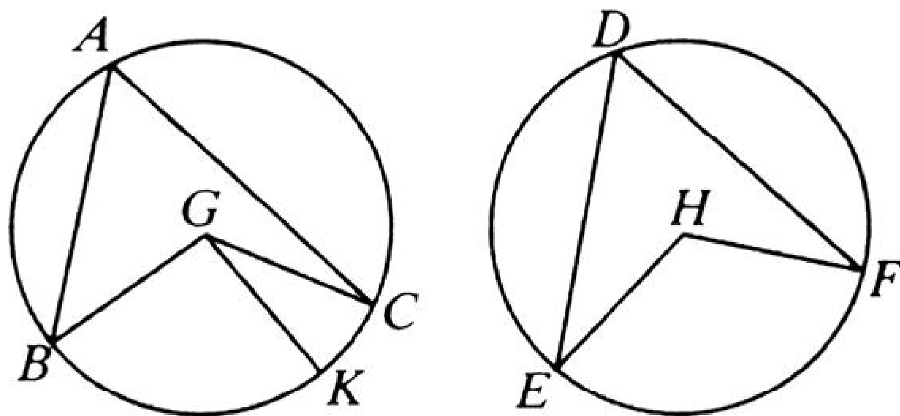
所以：余下的弧BKC等于余下的弧ELF。

证完。

命题27

…

在相等的圆中，相等圆周上的圆心角或者圆周角彼此相等。



设：圆ABC、DEF彼此相等，在相等的弧BC、EF上，角BGC、EHF在圆心G和H处，角BAC、EDF在圆周上。

那么可以说：角BGC等于角EHF，角BAC等于角EDF。

这是因为，若角*BGC*不等于角*EHF*，设角*BGC*是较大的：在线段*BG*上点*G*处，作角*BGK*等于角*EHF*。[I. 23]

当角在圆心处时，在等弧上的角相等，[III. 26]

所以：弧*BK*等于弧*EF*。

又因：弧*EF*等于弧*BC*，

所以：弧*BK*等于弧*BC*，

小的等于大的，这不符合实际，

所以：角*BGC*一定等于角*EHF*。

又因：点*A*处的角是角*BGC*的一半，点*D*处的角是角*EHF*的一半，[III. 20]

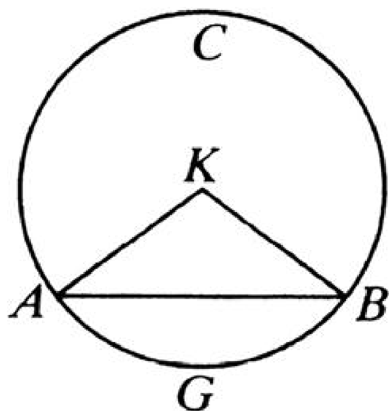
所以：在点*A*处的角等于在点*D*处的角。

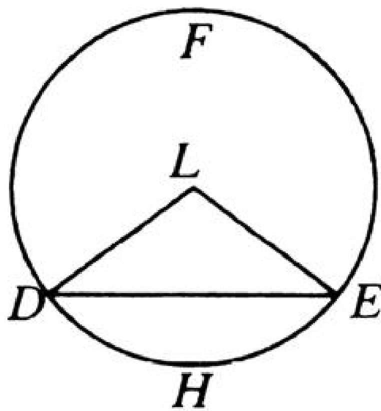
证完。

命题28

…

在等圆内相等的弦上截取相等的弧，优弧等于优弧，劣弧等于劣弧。





设：*ABC*、*DEF*是等圆，*AB*、*ED*是相等的弦，它们截取了优弧*ACB*与*DFE*与劣弧*AGB*与*DHE*。

那么可以说：优弧*ACB*等于优弧*DFE*，劣弧*AGB*等于劣弧*DHE*。

又设：*K*、*L*是给定的圆心，连接*AK*、*KB*、*DL*、*LE*。

因为：圆相等，半径也相等，

所以：两边*AK*、*KB*等于两边*DL*、*LE*；底*AB*等于底*DE*，

所以：角*AKB*等于角*DLE*。[I. 8]

而相等的圆心角所对的弧也相等，[III. 26]

所以：弧*AGB*等于弧*DHE*。

又因：整体圆*ABC*等于整体圆*DEF*，

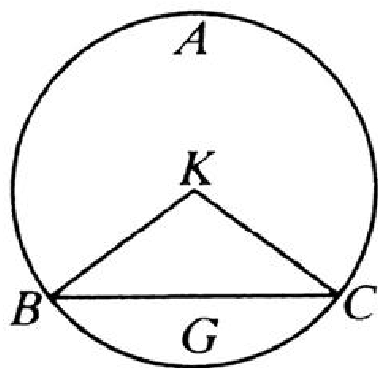
所以：余下的弧*ACB*等于余下的弧*DFE*。

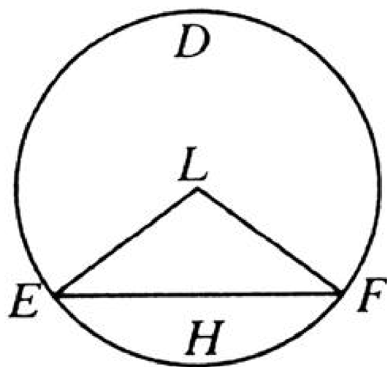
证完。

命题29

…

在相等的圆中，相等的弧所对的弦也相等。





设：圆*ABC*、*DEF*彼此相等，在两个圆中截取等弧*BGC*与*EHF*，连接弦*BC*、*EF*。

那么可以说：*BC*等于*EF*。

又设：*K*、*L*是已给定的圆心，连接*BK*、*KC*、*EL*、*LF*。

因为：弧*BGC*等于弧*EHF*，

角*BKC*等于角*ELF*，[III. 27]

又因：圆*ABC*、*DEF*相等，半径也相等，

所以：两边*BK*、*KC*等于两边*EL*、*LF*，它们的夹角也相等，

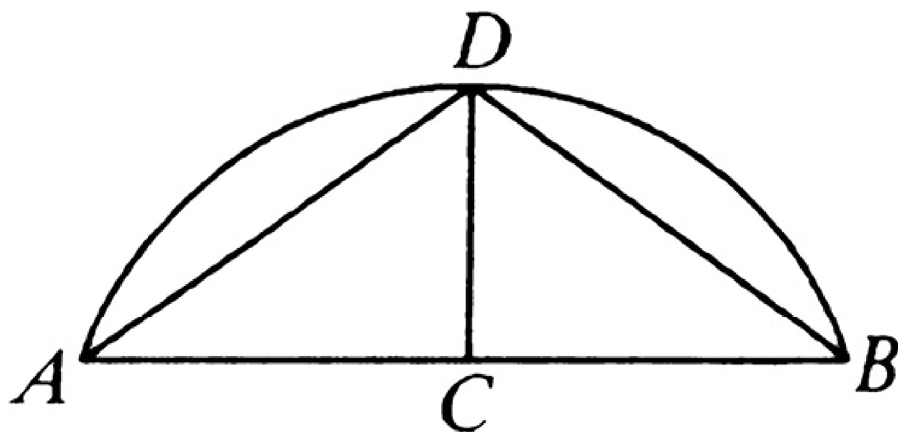
所以：底*BC*等于底*EF*。[I. 4]

证完。

命题30

…

将给定的弧形二等分。



设：*ADB*是给定的弧，要求将其二等分。

连接AB，于C点处将其二等分；从点C向直线AB作CD成直角，连接AD、DB。

因为：AC等于CB，CD是公共的，两边AC、CD等于两边BC、CD；角ACD与角BCD都是直角，彼此相等，

所以：底AD等于底DB，[I. 4]

而相等的弦截出相等的弧，优弧等于优弧，劣弧等于劣弧，[III. 28]

又因：AD、DB的每一个都小于半圆，

所以：弧AD等于弧DB，

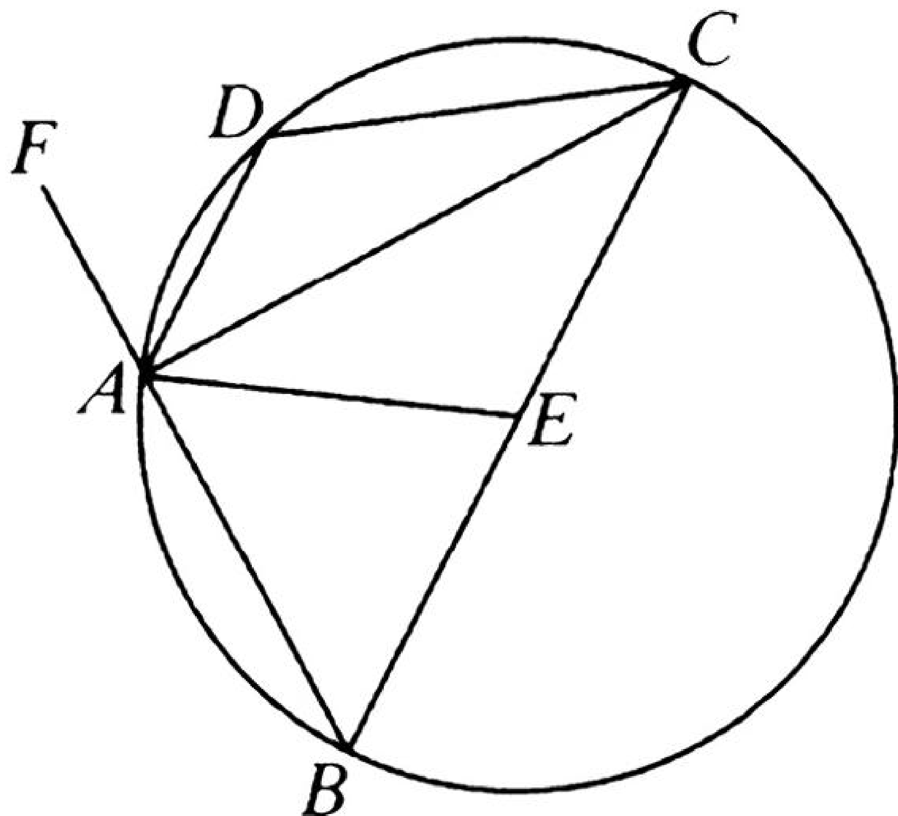
所以：点D二等分给定的弧ADB。

作完。

命题31

…

圆内半圆上的角是直角，较大弓形上的角小于一直角，较小弓形上的角大于一直角；此外，较大弓形的角大于一直角，较小弓形的角小于一直角。



设：*ABCD*是一个圆，*BC*是其直径，*E*是圆心，连接*BA*、*AC*、*AD*、*DC*。

那么可以说：半圆*BAC*上的角*BAC*是直角，

在大于半圆的弓形*ABC*上的角*ABC*小于一直角，

在小于半圆的弓形*ADC*上的角*ADC*大于一直角。

连接*AE*，将*BA*延长到*F*。

因为：*BE*等于*EA*，角*ABE*等于角*BAE*，[I. 5]

又因：*CE*等于*EA*，

角*ACE*等于角*CAE*，[I. 5]

所以：整体角*BAC*等于角*ABC*、*ACB*的和。

又因：角*FAC*是三角形*ABC*的外角，等于角*ABC*、*ACB*的和，[I. 32]

所以：角*BAC*等于角*FAC*，

所以：每一个角都是直角，[I. 定义10]

所以：半圆*BAC*上的角*BAC*是直角。

因为：在三角形*ABC*内两角*ABC*、*BAC*的和小于两直角，[I. 17]

角*BAC*是直角，角*ABC*小于直角，并且它是在大于半圆的弓形*ABC*上的角，

又因：*ABCD*是圆内接四边形，

而在圆内接四边形中对角的和等于二直角，[III. 22]

且角*ABC*小于一直角，

所以：余下的角*ADC*大于一个直角，并且它是在小于半圆的弓形*ADC*上的角。

同理可证：由弧*ABC*和弦*AC*所构成的较大的弓形角大于一个直角；由弧*ADC*和弦*AC*所构成的较小的弓形角小于一个直角。

这是显而易见的。

因为：直线*BA*、*AC*所构成的角是直角，

所以：由弧*ABC*与弦*AC*所构成的角大于一直角。

又因：由弦*AC*和*AF*所构成的角是直角，

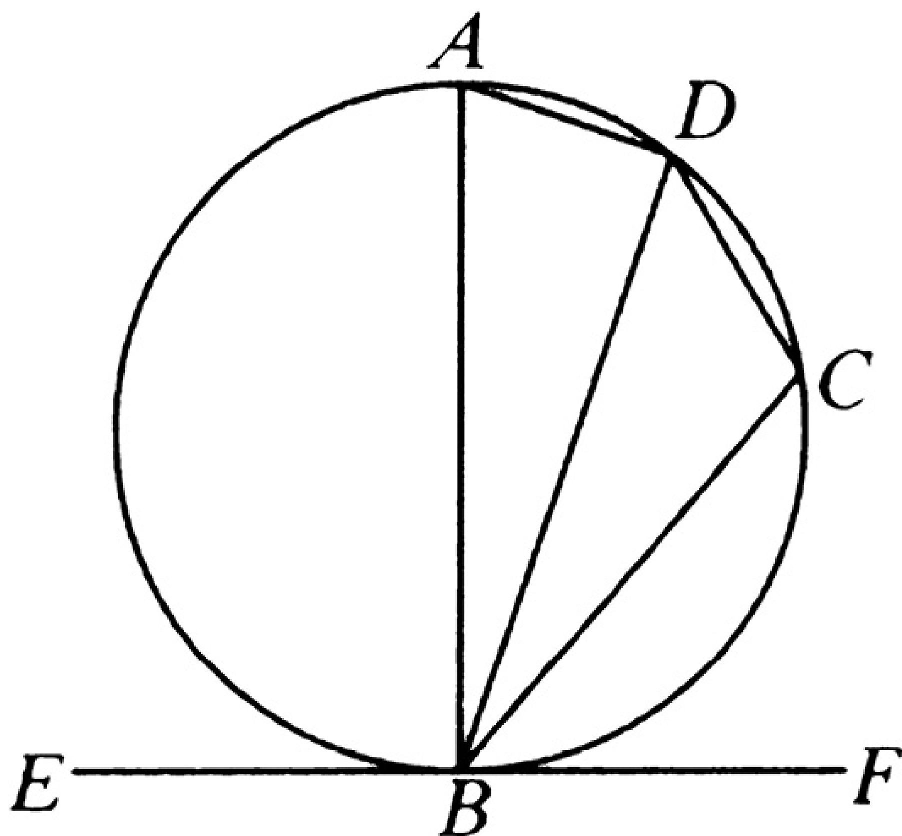
所以：弦*CA*与弧*ADC*所构成的角小于一直角。

作完。

命题32

…

假如一条直线与一个圆相切，并且由切点作一条过圆内部的直线和圆相截，那么这个直线和切线所成的角等于另一弓形上的角。



设：圆*ABCD*被直线*EF*切于点*B*，从点*B*作圆*ABCD*内直线*BD*和圆相交。

那么可以说：*BD*和切线*EF*所成的角等于在另一个弓形上的角，也就是角*FBD*等于在弓形上的角*BAD*，并且角*EBD*等于弓形上的角*DCB*。

因为：从*B*作*BA*与*EF*成直角，在弧*BD*上任取一点*C*，连接*AD*、*DC*、*CB*，

且直线*EF*切圆*ABCD*于*B*，从切点作*BA*和切线成直角，

所以：圆*ABCD*的圆心在*BA*上，[III. 19]

所以：*BA*是圆*ABCD*的直径，

那么：角*ADB*就是半圆上的角，是直角，[III. 31]

因此：其余的角*BAD*、*ABD*的和等于一直角。[I. 32]

又因：角*ABF*也是直角，

所以：角*ABF*等于角*BAD*、*ABD*的和。

设：从以上两边各减去角*ABD*，

那么：余下的角*DBF*等于*BAD*，它在相对的弓形上。

因为：*ABCD*是圆内接四边形，

它的对角之和等于两直角，[III. 22]

又因：角*DBF*、*DBE*的和等于两直角，

所以：角*DBE*、*DBE*的和等于角*BAD*、*BCD*的和。

且已经证明：角*BAD*等于角*DBF*，

因此：余下的角*DBE*等于相对弓形*DCB*上的角*DCB*。

证完。

命题33

…

在给定的线段上做一弓形，使它所含的角等于给定的直线角。

设：已给定线段*AB*，且已知角*C*。

那么：需在*AB*上作一个弓形，让它所含的角等于点*C*处的角。*C*处

的角可以是锐角、直角或是钝角。

先设C是锐角。

图1

如图1中，在直线AB上的点A处作角BAD等于在C处的角。

所以：角BAD是锐角。

作AE和DA成直角，F将AB二等分；由点F作FG和AB成直角，连接GB。

因为：AF等于FB，FG是公共的，

两边AF等于BF，且FG等于FG，角AFG等于角BFG，

所以：底AG等于底BG，[I. 4]

所以：以G为圆心，GA为半径，经过B作圆ABE；连接EB。

因为：由端点A作AD和AE成直角，

所以：AD切于圆ABE。[III. 16，推论]

因为：直线AD切于圆ABE，从切点A作一直线AB经过圆ABE内部，

角DAB等于在相对弓形上的角AEB，[III. 32]

又因：角DAB等于在C处的角，

因此：在C处的角等于角AEB，

所以：在已知直线AB上可作包含角AEB的弓形AEB，使角AEB等于C处的已知角。

再设C是直角。

要求在AB上作一弓形使它所含的角等于C处的直角。

设：已作角BAD，并等于点C处的直角，如图2。

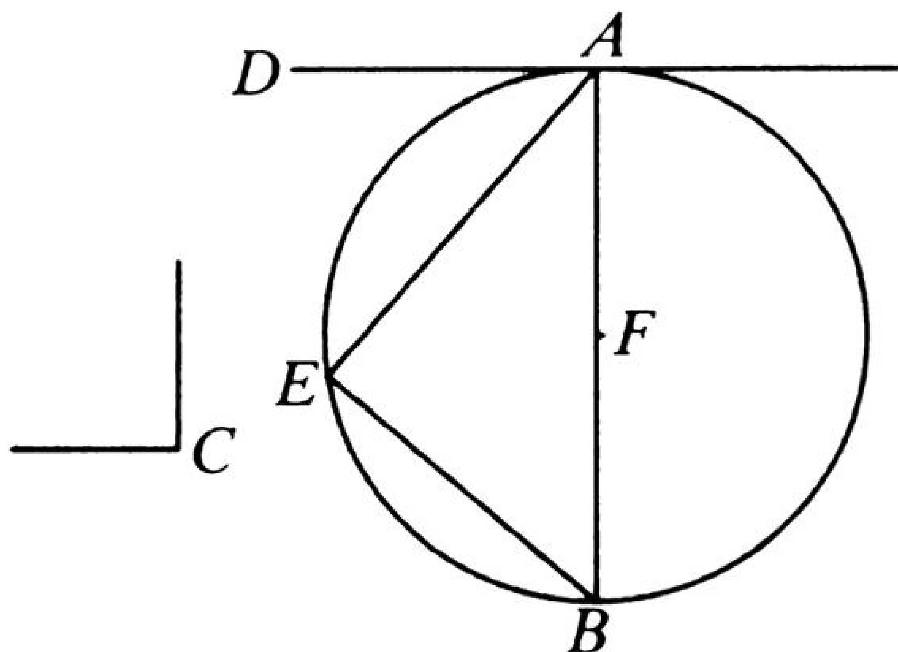


图2

设：AB二等分于F，以F为圆心，以FA或FB为半径画圆AEB。

而直线AD切于圆ABE，这是因为，在点A处是直角。[III. 16，推论]

又因：角BAD等于在弓形AEB上的角，因为AEB是半圆上的角，因此是直角，[III. 31]

而角BAD等于在C处的角，

所以：角AEB等于C处的角，

所以：在AB上又可作包含等于C处的角的弓形AEB，

最后设C为钝角。

在线段AB上的点A作角BAD等于C处的角，如图3。

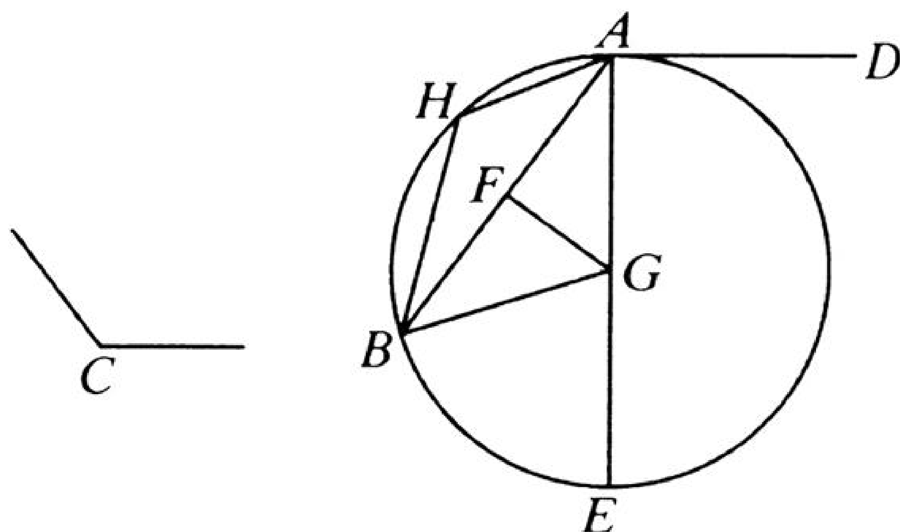


图3

作AE和AD成直角，AB被F二等分，作FG与AB成直角，连接GB。

因为：AF等于FB，FG是公共的，

两边AF、FG等于两边BF、FG，且角AFG等于角BFG，

所以：底AG等于底BG。[I. 4]

以G为圆心，以GA为半径且过B，作圆AEB。

因为：由直径的端点作的AD和直径AE成直角，

所以：*AD*切于圆*AEB*。[III. 16，推论]

又因：*AB*过切点*A*且与圆相交，

所以：角*BAD*等于作在相对弓形*AHB*上的角。[III. 32]

因为：角*BAD*等于*C*处的角，

所以：在弓形*AHB*上的角等于*C*处的角，

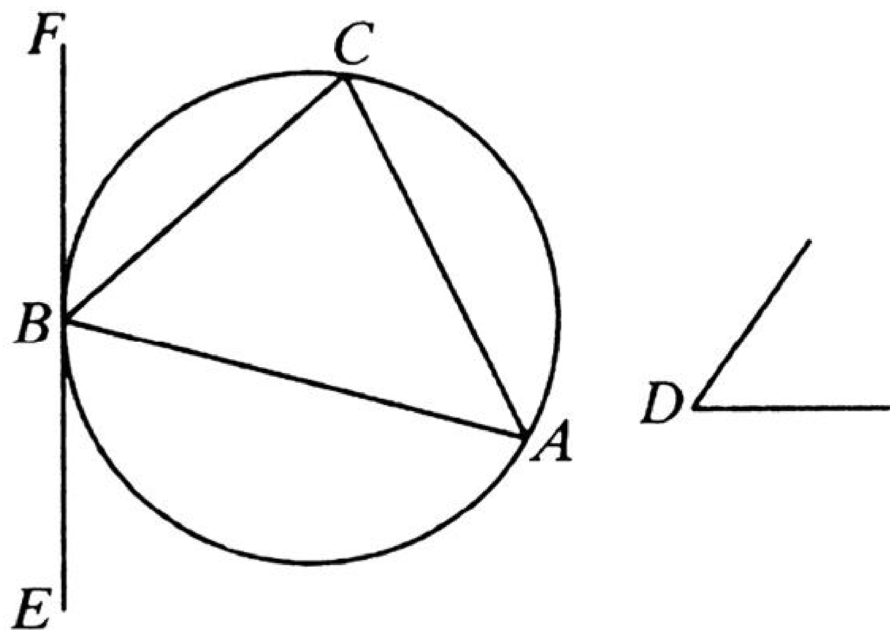
所以：在已给定的线段*AB*上作了包含等于*C*处角的弓形*AHB*。

作完。

命题34

…

从给定的圆中截出一弓形，使其包含的角等于已知的直线角。



设：*ABC*是已给定的圆，在*D*的角是已知的直线角。

要求由圆*ABC*截出包含等于在*D*处的已知直线角的弓形。

又设：*EF*切*ABC*于点*B*，且在直线*FB*上的点*B*处作角*FBC*，等于在*D*处的角。[I. 23]

因为：直线*EF*切于圆*ABC*。

且由切点*B*作经过圆内的弦*BC*，角*FBC*等于在相对弓形*BAC*的角，[III. 32]

又因：角*FBC*等于在*D*处的角，

所以：弓形*BAC*上的角等于*D*处的角，

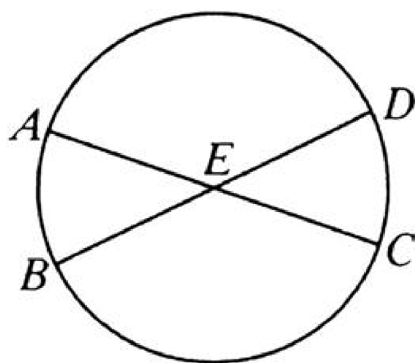
所以：这便从给定圆*ABC*已经截出了弓形*BAC*，它包含的角等于已知的直线角，即*D*处的角。

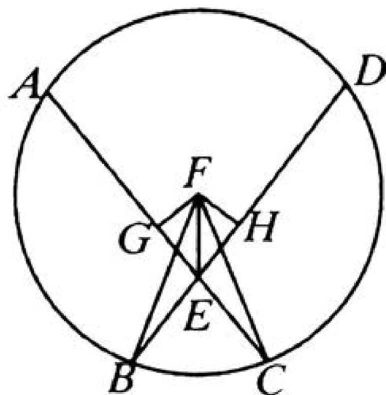
作完。

命题35

…

若圆内有两条相交的弦，把其中一条分成两段，使其围成的矩形等于另一条分成两段围成的矩形。





设：圆*ABCD*内两条弦*AC*、*BD*交点*E*。

那么可以说：AE、EC围成的矩形等于由DE、EB围成的矩形。

若AC、BD经过圆心，设E是圆$ABCD$的圆心，那么，AE、EC、DE、EB相等。

由AE、EC围成的矩形等于由DE、EB围成的矩形。

又设：AC、DB不过圆心；设F为圆$ABCD$的圆心。

由F作FG、FH分别垂直于弦AC、DB；连接FB、FC、FE。

因为：直线GF经过圆心，且交一条不经过圆心的弦AC，并与它形成直角，且二等分它，[III. 3]

所以：AG等于GC。

因为：弦AC被二等分于G且不等分于E，由AE、EC围成的矩形与EG上的正方形的和，等于GC上的正方形，[II. 5]

将GF上的正方形加在以上两边，

那么：矩形AE、EC与GE、GF上的正方形的和等于CG、GF上的正方形的和。

又因：FE上的正方形等于EG、GF上的正方形的和，

且FC上的正方形等于CG、GF上的正方形的和，[I. 47]

所以：矩形AE、EC与FE上的正方形的和等于FC上的正方形。

又因：FC等于FB，

所以：矩形AE、EC与EF上的正方形的和等于FB上的正方形。

同理可证：矩形DE、EB与FE上的正方形的和等于FB上的正方形。

但已证明，矩形AE、EC与EF上的正方形之和已被证明了等于FB上的正方形，

所以：矩形*AE*、*EC*与*FE*上的正方形之和等于矩形*DE*、*EB*与*FE*上的正方形之和。

由以上两边各减去*FE*上的正方形，

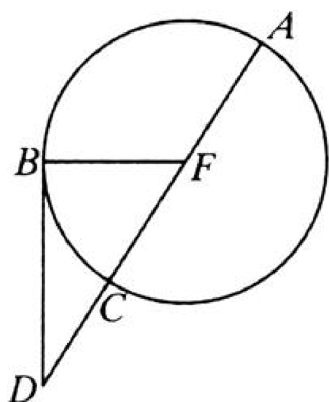
所以：余下的由*AE*、*EC*围成的矩形等于由*DE*、*EB*围成的矩形。

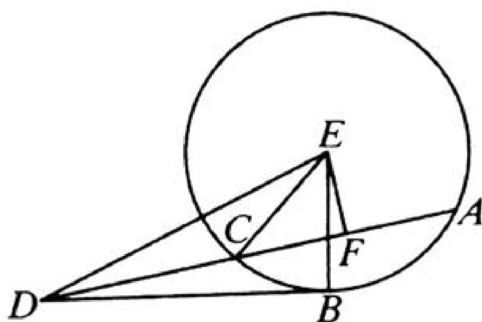
证完。

命题36

…

若在圆外取一点，从它向圆作两条直线，其中一条与圆相截，而另一条与圆相切，那么由圆截得的整条线段与圆外定点和凸弧之间一段围成的矩形，等于切线上的正方形。





设：在圆*ABC*外取一点*D*，由点*D*向圆上作两条直线，即*DCA*、*DB*；

*DCA*截圆*ABC*，而*BD*切于圆，

那么可以说：由*AD*、*DC*围成的矩形等于*DB*上的正方形，

因此：*DCA*可能经过圆心，也可能不经过。

先设*DCA*经过圆心。

设：F是圆ABC的圆心，连接FB。

那么：FBD是直角。[III. 18]

因为：F二等分AC，CD是加在它上的线段，

且矩形AD、DC与FC上的正方形的和等于FD上的正方形，[II. 6]

又因：FC等于FB，

所以：矩形AD、DC与FB上的正方形的和，等于FD上的正方形。

因为：FB、BD上的正方形的和等于FD上的正方形，[I. 47]

所以：矩形AD、DC与FB上的正方形的和等于FB、BD上的正方形的和。

设：由以上两边各减去FB上的正方形，

那么：余下的矩形AD、DC等于切线DB上的正方形，

再设DCA不经过ABC的圆心。

取圆心E，由E作EF垂直于AC；连接EB、EC、ED。

那么：角EBD是直角。[III. 18]

因为：一条直线EF经过圆心，并交不经过圆心的弦AC成直角，且二等分它，[III. 3]

所以：AF等于FC。

因为：线段AC被F二等分，把CD加在它上边，

由AD、DC围成的矩形与FC上的正方形的和，等于FD上的正方形，[III. 6]

将FE上的正方形加在以上各边，

那么：矩形AD、DC与CF、FE上的正方形的和等于FD、FE上的正方

形的和。

而EC上的正方形等于CF、FE上的正方形的和，是因为角EFC是直角，[I. 47]

且ED上的正方形等于DF、FE上的正方形的和，

所以：矩形AD、DC与EC上的正方形的和等于ED上的正方形。

又因：EC等于EB，

所以：矩形AD、DC与EB上的正方形的和等于ED上的正方形。

又因：角EBD是直角，

所以：EB、BD上的正方形的和等于ED上的正方形，[I. 47]

所以：矩形AD、DC与EB上的正方形的和等于EB、BD上的正方形的和。

由以上两边各减去EB上的正方形。

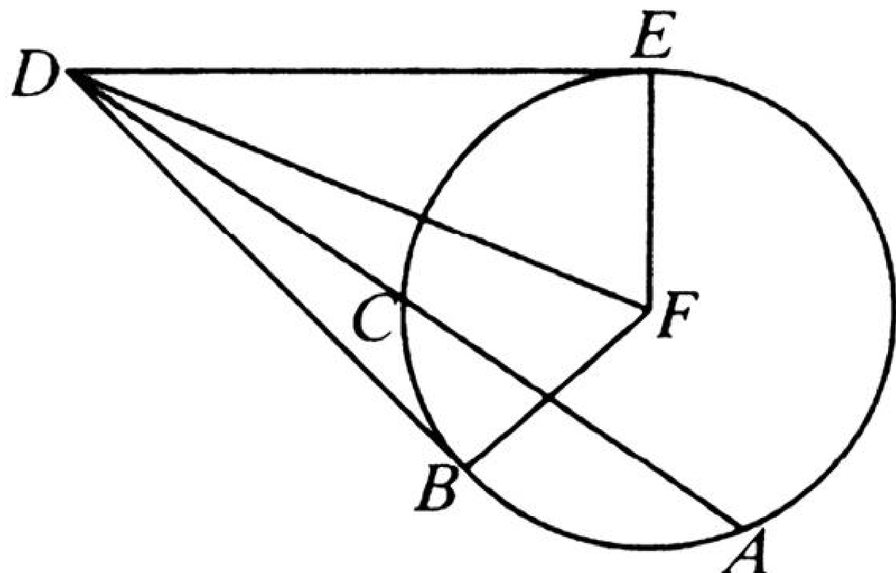
那么余下的矩形AD、DC等于DB上的正方形。

证完。

命题37

…

若在圆外取一点，由这点向圆外引两条直线，其中一条与圆相截，另一条落在圆上。若由截圆的整条线段与该点和凸弧之间的圆外一段围成的矩形等于落在圆上的线段上的正方形，则落在圆上的直线切于此圆。



设：在圆*ABC*外取一点*D*，由点*D*作两条直线*DCA*、*DB*落在圆*ACB*上；

*DCA*截圆，*DB*落在圆上。

又设：矩形*AD*、*DC*等于*DB*上的正方形。

那么可以说：*DB*切于圆*ABC*。

为此，作*DE*切于*ABC*，设*ABC*的圆心为*F*。连接*FE*、*FB*、*FD*。

则角*FED*是直角。[III. 18]

因为：*DE*切圆*ABC*且*DCA*截此圆，

矩形*AD*、*DC*等于*DE*上的正方形，[III. 36]

又因：矩形*AD*、*DC*等于*DB*上的正方形，

所以：*DE*上的正方形等于*DB*上的正方形，

所以：*DE*等于*DB*。

因为：*FE*等于*FB*，

所以：两边DE、EF等于两边DB、BF，

且FD是三角形的公共底，

所以：角DEF等于角DBF。[I. 8]

又因：角DEF是直角，

所以：角DBF也是直角。

将BF延长成一直径，由圆的直径的端点作一直线与该直径成直角，那么这个直线切于圆，[III. 16，推论]

所以：DB切于此圆。

同理可证：圆心在AC上的情况。

证完。

卷IV

定义

01 当一直线形的各角的顶点分别位于另一直线形的各边上时，则称这一直线形内接于后一直线形。

02　类似地，当一个图形的各边分别经过另一个图形的各角的顶点时，则称前一图形外接于后一图形。

03 当一直线形的每一个角的顶点都位于一个圆的圆周上时，则称这一直线形内接于圆。

04 当一直线形的每条边都切于一个圆的圆周时，则称这一直线形外切于圆。

05 类似地，当一个圆的圆周在一个图形内，并切于这个图形的每一条边时，称这个圆内切于这个图形。

06 当一个圆的圆周经过一个图形的每个角的顶点时，则称这个圆外接于这个图形。

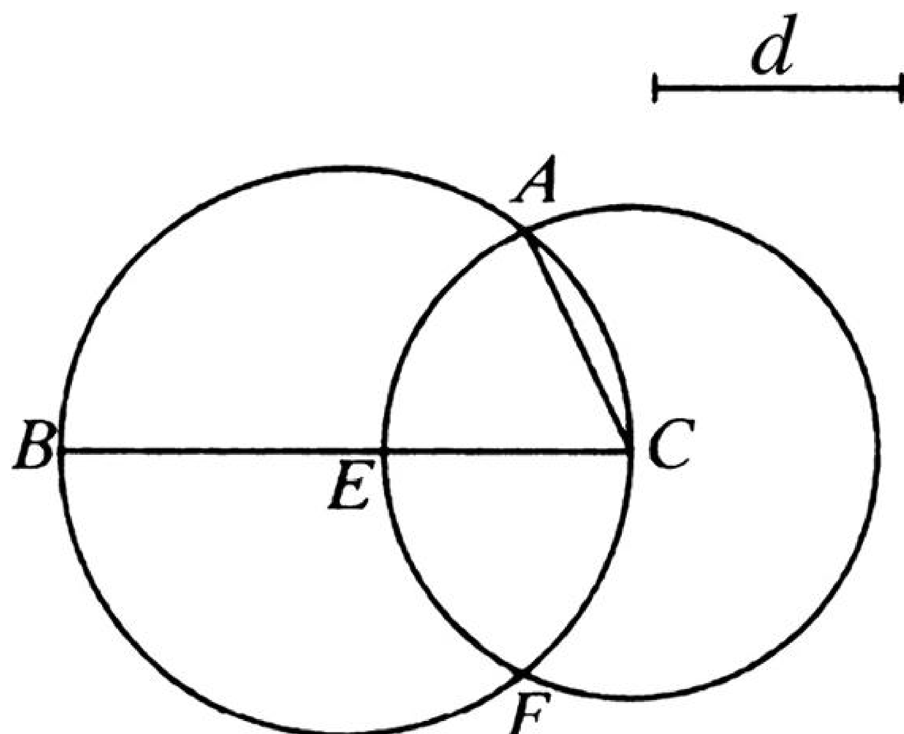
07 当一条线段的两个端点在一个圆的圆周上时，则称这条线段拟合于圆（即是圆的弦）。

命题

命题1

…

给定一条线段不大于一个圆的直径，将这条线段拟合于这个圆。



设：已知圆ABC，d为不大于此圆直径的给定线段。

要求：作圆ABC的一条弦，让它等于线段d。

作：圆ABC的直径BC。

若BC等于d，就不用再作此线段，因为BC拟合于圆ABC并且等于线段d。

如果BC大于d。

取CE等于d，以C为圆心，以CE为半径作圆EAF。

连接CA。

因为：点C是圆EAF的圆心，故CA等于CE，

又因：CE等于d，故d等于CA，

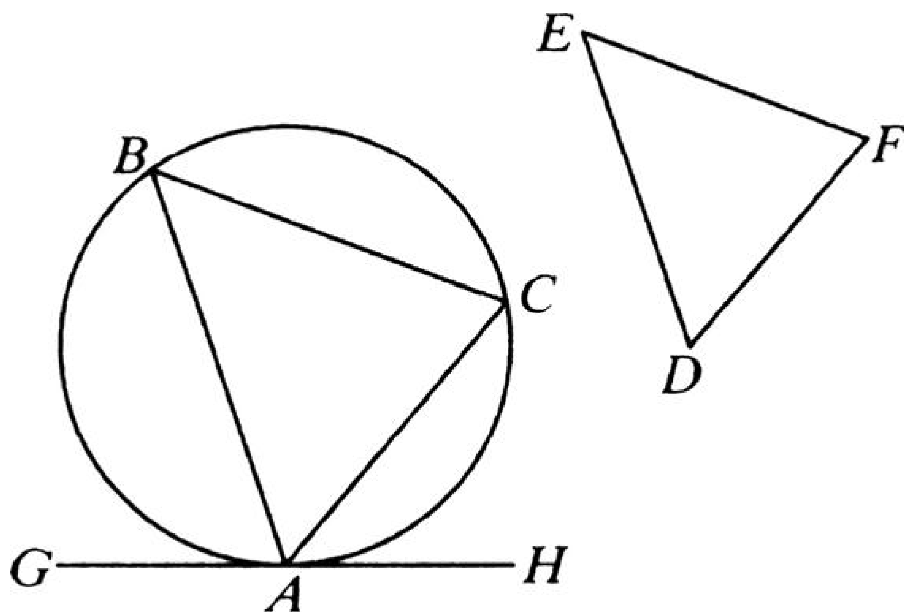
所以：在给定圆ABC内拟合了一条等于已知线段d的弦CA。

作完。

命题2

…

在已知圆内作一个与给定三角形等角的内接三角形。



设：已知圆ABC，三角形DEF。

要求：在圆ABC内作一个与三角形DEF等角的内接三角形。

设：在点A作GH切于圆ABC；[III. 16，推论]

在直线AH上的点A作角HAC等于角DEF。

在直线AG上的点A作角GAB等于角DFE。[I. 23]

连接BC。

因为：直线AH切于圆ABC，并且从切点A作一直线AC经过圆的内部，

所以：角HAC等于相对弓形上的角ABC。[III. 32]

又因：角HAC等于角DEF，

所以：角ABC等于角DEF。

同理可证：角ACB等于角DFE，

因此：余下的角BAC等于余下的角EDF，[I. 32]

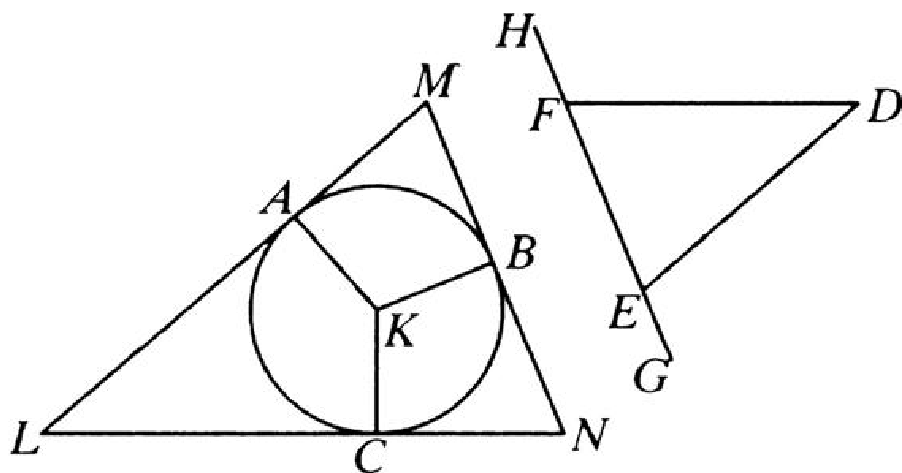
所以：在已知圆内作了一个与给定三角形等角的内接三角形。

作完。

命题3

…

在已知圆外作一个与给定三角形等角的外切三角形。



设：已知圆*ABC*，已知三角形*DEF*。

要求：作圆*ABC*的一个与三角形*DEF*等角的外切三角形。

将*EF*两端向外延长至*G*、*H*。

设：圆*ABC*的圆心为*K*。[III. 1]

作任意直线*KB*，在直线*KB*上的点*K*作角*BKA*等于角*DEG*，角*BKC*等于角*DFH*；[I. 23]

再过点*A*、*B*、*C*作直线*LAM*、*MBN*、*NCL*切于圆*ABC*。[III. 16，推论]

因为：*LM*、*MN*、*NL*切圆*ABC*于点*A*、*B*、*C*；并且由圆心*K*到点*A*、*B*、*C*连接*KA*、*KB*、*KC*，

所以：在点*A*、*B*、*C*处的角等于直角。[III. 18]

因为：四边形*AMBK*可以分为两个三角形，

所以：*AMBK*的四个角的和等于四直角。

因为：四边形*AMBK*可以分为两个三角形，

所以：*AMBK*的四个角的和等于四直角。

又因：角*KAM*、*KBM*是直角，

所以：余下的角*AKB*、*AMB*的和等于两直角。

又因：角*DEG*、*DEF*的和等于两直角，[I. 13]

所以：角*AKB*、*AMB*的和等于角*DEG*、*DEF*的和，角*AKB*等于角*DEG*，

所以：余下的角*AMB*等于余下的角*DEF*。

同理可证：角*LNB*等于角*DFE*，

因此：余下的角*MLN*等于角*EDF*，[I. 32]

所以：三角形*LMN*与三角形*DEF*等角，并且它外切于圆*ABC*，

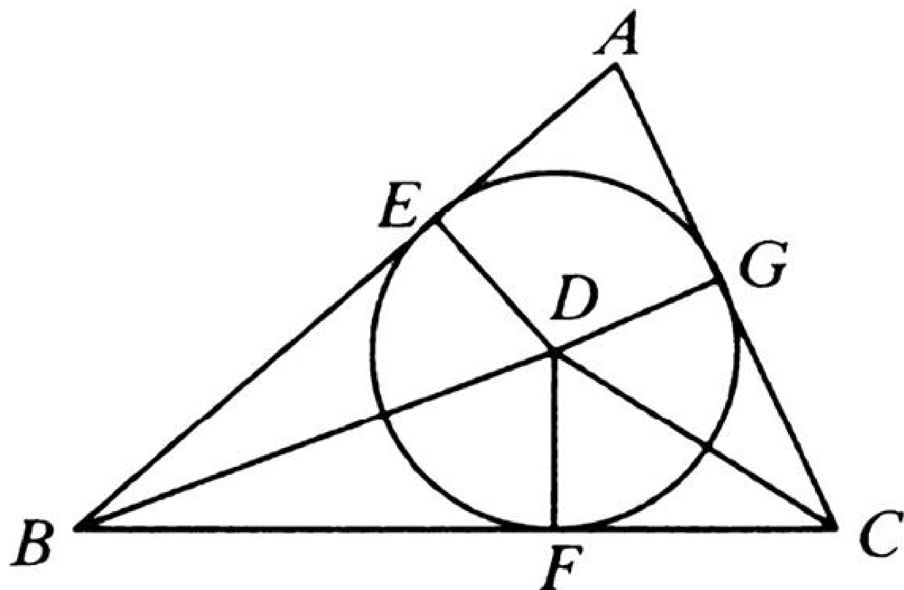
所以：在已知圆外作了一个与给定三角形等角的外切三角形。

作完。

命题4

…

求作已知三角形的内切圆。



设：已知三角形*ABC*；

要求：作三角形*ABC*的内切圆。

设：角*ABC*、*ACB*分别被直线*BD*、*CD*二等分。[I. 9]

且*BD*、*CD*相交于一点*D*。

由点*D*作*DE*、*DF*、*DG*垂直于直线*AB*、*BC*、*CA*。

因为：角*ABD*等于角*CBD*，并且直角*BED*等于直角*BFD*，

EBD、*FBD*是两个三角形，有两个角相等，又有一条边等于一条边，也就是对着相等角的一边，两三角形的公共边*BD*，

所以：其余的边等于其余的边，[I. 26]

所以：*DE*等于*DF*。

同理可证：*DG*等于*DF*，

因此：线段*DE*、*DF*、*DG*彼此相等。

因为：在点*E*、*F*、*G*处的角是直角，

所以：以D为圆心，以DE、DF、DG之一为半径画圆经过其余的点，并且相切于直线AB、BC、AC。

事实上，如果圆不切于这些直线，则与它们相交。

那么：过圆的直径的端点和直径成直角的直线就有一部分落在圆内，

这已经证明是不符合常理的，[III. 16]

所以：以D为圆心，以线段DE、DF、DG之一为半径所作的圆不能与直线AB、BC、CA相交，

故：圆FGE切于它们，也就是内切于三角形ABC。[IV. 定义5]

设：内切圆为FGE，

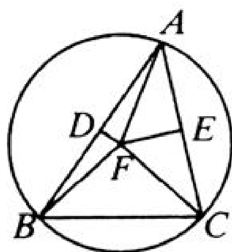
所以：圆EFG内切于已知的三角形ABC。

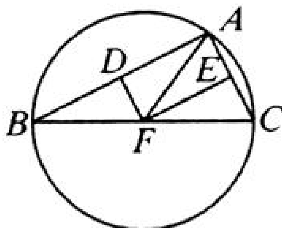
作完。

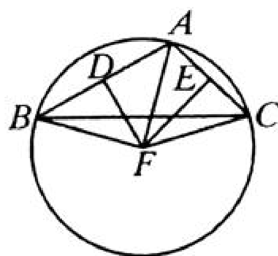
命题5

…

求作已知三角形的外接圆。







设：已给定三角形ABC。

要求：作三角形ABC的外接圆。

设：D点将线段AB二等分，E点将线段AC二等分。

且在D、E作DF、EF与AB、AC成直角，它们相交在三角形ABC内，或者在直线BC上，或者在BC之外。

先设：它们相交在三角形内，交点为F。连接FB、FC、FA。

因为：AD等于DB，并且DF是公共的，成直角，

所以：底AF等于底FB。[I. 4]

同理可证：CF等于AF，且FB等于FC，

因此：三条线段FA、FB、FC彼此相等，

所以：以F为圆心，以线段FA、FB、FC之一为半径作圆经过其余的点，该圆外接于三角形ABC。

作外接圆ABC。

又设：DF、EF相交在直线BC上的点F，连接AF。

同理可证：点F是三角形ABC的外接圆的圆心。

最后，设：DF、EF相交在三角形外部的F，连接AF、BF、CF。

因为：AD等于DB，且DF是公共的，又成直角，

所以：底AF等于底BE。[I. 4]

同理可证：CF等于AF，

因此：BF等于FC。

所以：以F为圆心，以线段FA、FB、FC之一为半径画圆经过其他的点，

因此：这个圆外接于三角形ABC，

所以：作了给定三角形的外接圆。

作完。

显然，当圆心落在三角形内时，角BAC在大于半圆的弓形内，它小于一直角；

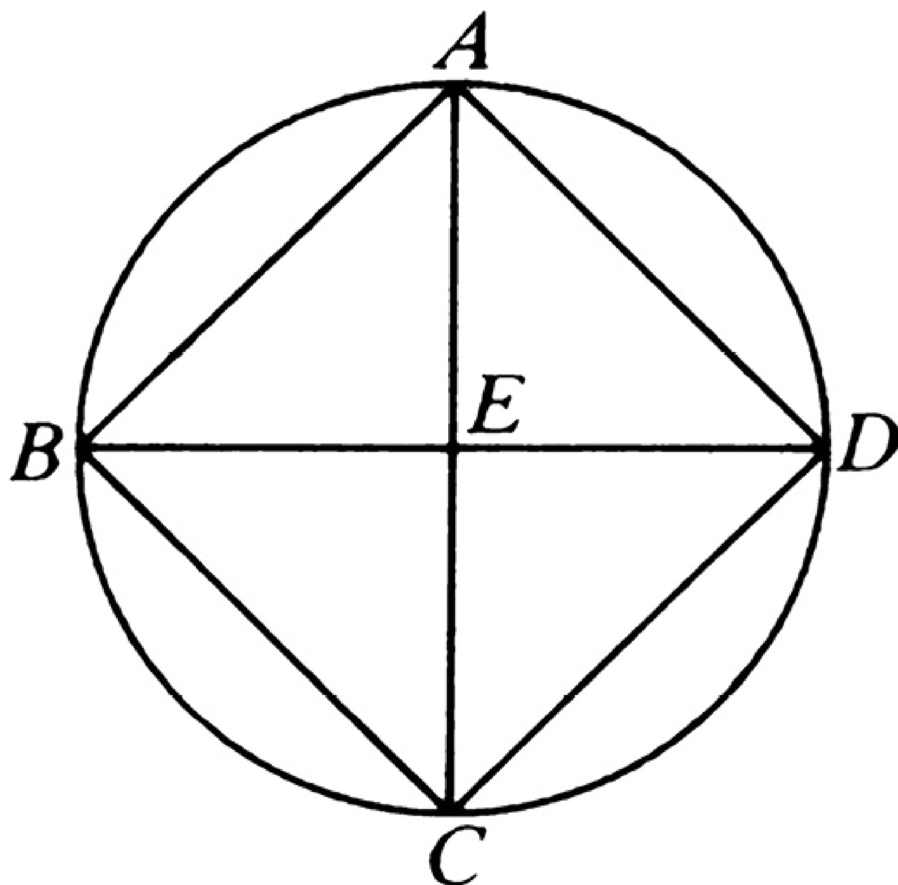
当圆心落在弦BC上时，角BAC在半圆上，它是一直角；

当圆心落在三角形外时，角BAC在小于半圆的弓形上，它大于一直角。[III. 31]

命题6

…

求作已知圆的内接正方形。



设：已知圆$ABCD$。

要求：作圆$ABCD$的内接正方形。

作圆$ABCD$的两条互为直角的直径AC、BD。

连接AB、BC、CD、DA。

因为：E是圆心，

所以：BE等于BD。

又因：EA是公共的，并且与它们成直角，

所以：底AB等于底AD。[I. 4]

同理可证：线段BC、CD的每一条等于线段AB、AD的每一条，

因此：四边形$ABCD$是等边的。

其次，又可证它是直角的。

因为：线段BD是圆$ABCD$的直径，

所以：BAD是半圆，

所以：角BAD是直角。[III. 31]

同理可证：角ABC、BCD、CDA的每一个都是直角，

所以：四边形$ABCD$是直角的。

又因：已经证明它同时也是等边的，

所以：四边形$ABCD$是一个正方形，[I. 定义22]

并且内接于圆$ABCD$，

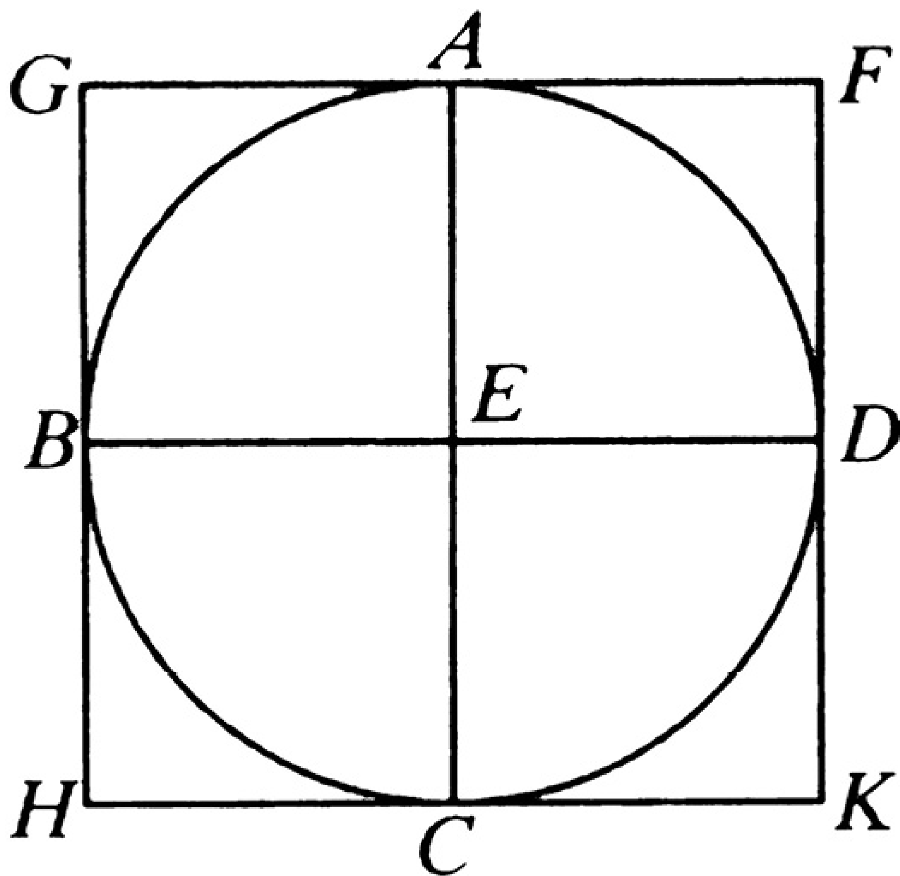
所以：在已知圆内作了内接正方形$ABCD$。

作完。

命题7

…

求作已知圆的外切正方形。



设：已知圆*ABCD*。

要求：作圆*ABCD*的外切正方形。

画圆*ABCD*互为直角的两条直径*AC*、*BD*；并且过点*A*、*B*、*C*、*D*作*FG*、*GH*、*HK*、*KF*切于圆*ABCD*。[III. 16，推论]

那么：*FG*切于圆*ABCD*，并且由圆心*E*到切点*A*连接*EA*，

因此：在点*A*的角是直角。[III. 18]

同理可证：在点*B*、*C*、*D*的角也是直角。

因为：角*AEB*是直角，角*EBG*也是直角，

所以：*GH*平行于*AC*。

同理可证：*AC*也平行于*FK*，[I. 28]

所以：*GH*也平行于*FK*。[I. 30]

同样可以证明，直线*GF*、*HK*的每一条都平行于*BED*，

所以：*GK*、*GC*、*AK*、*FB*、*BK*是平行四边形，

所以：*GF*等于*HK*，*GH*等于*FK*。[I. 34]

又因：*AC*等于*BD*，并且*AC*等于线段*GH*、*FK*的每一条，且*BD*等于线段*GF*、*HK*的每一条，[I. 34]

所以：四边形*FGHK*是等边的。

又可证明四边形*FGHK*是直角的。

因为：*GBEA*是平行四边形，且角*AEB*是直角，

所以：角*AGB*也是直角。[I. 34]

同理可证：在*H*、*K*、*F*处也是直角，

所以：*FGHK*是直角的。

又因：它已被证明是等边的，

所以：*FGHK*是一个正方形，且外切于圆*ABCD*，

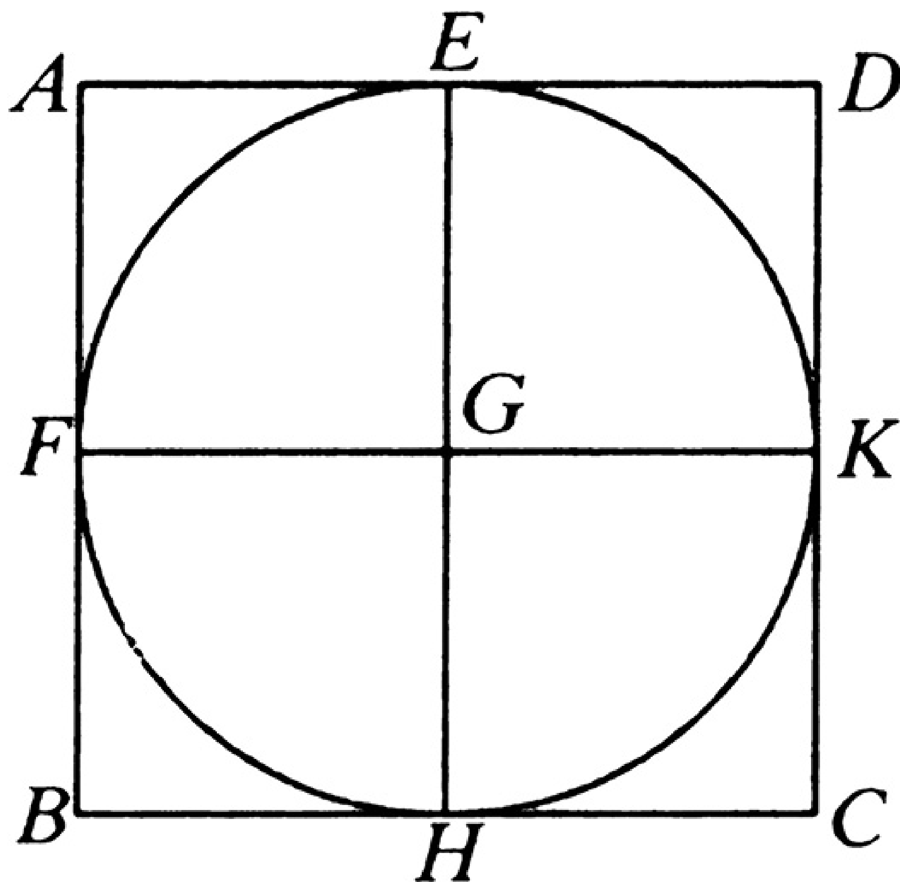
因此：对已知圆作了外切正方形。

作完。

命题8

…

求作已知正方形的内切圆。



设：已知正方形*ABCD*。

要求：作此正方形的内切圆。

设：线段*AD*、*AB*分别被二等分于*E*、*F*。[I. 10]

过*E*作*EH*平行于*AB*或者*CD*，并且过*F*作*FK*平行于*AD*或者*BC*，[I.

31]

因此：图形AK、KB、AH、HD、AG、GC、BG、GD的每一个都是平行四边形，

所以：它们的对边相等。[I. 34]

因为：AD等于AB，AE是AD的一半，AF是AB的一半，

所以：AE等于AF。

又因：对边也相等，

所以：FG等于GE。

同理可证：线段GH、GK的每一个等于线段FG、GE的每一个，

所以：四条线段GE、GF、GH、GK是彼此相等的，

所以：以G为圆心且以线段GE、GF、GH、GK之一为半径画圆必经过其余各点。

又因：在点E、F、H、K的角是直角，

所以：它切于直线AB、BC、CD、DA。

因为：如果圆截AB、BC、CD、DA，

那么，由圆的直径的端点作与直径成直角的这条线落在圆内。这是不符合常理的，[III. 16]

因此：以G为圆心，以线段GE、GF、GH、GK之一为半径所画的圆不与直线AB、BC、CD、DA相交，

所以：这个圆切于正方形$ABCD$，

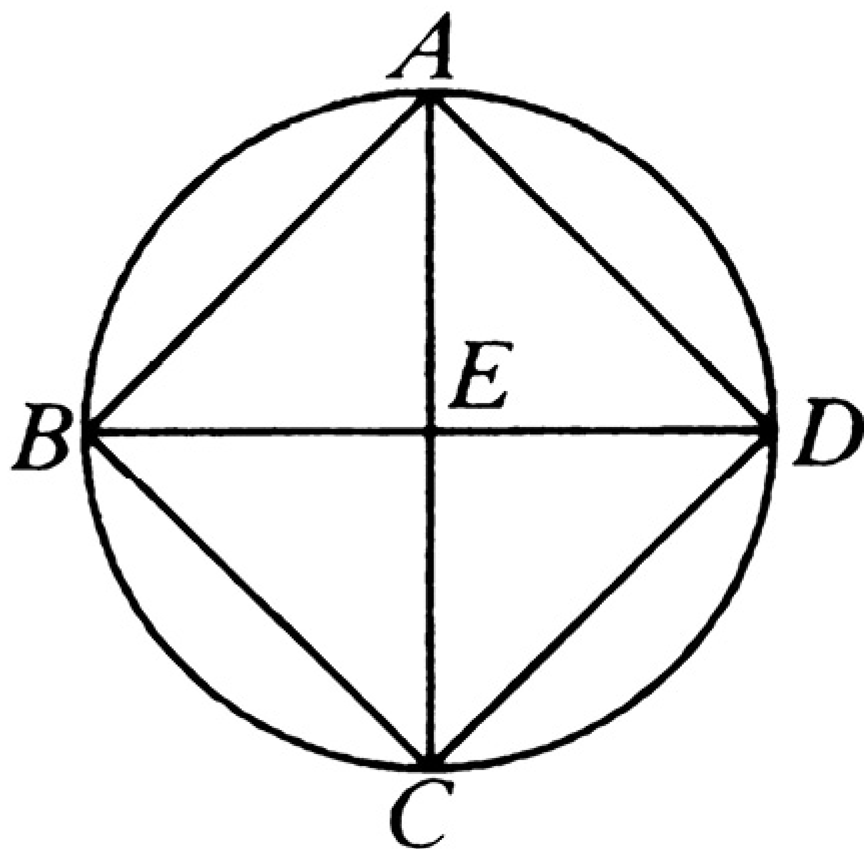
所以：在已知正方形$ABCD$内作了它的内切圆。

作完。

命题9

…

求作已知正方形的外接圆。



设：已知正方形$ABCD$。

要求：作正方形$ABCD$的外接圆。

连接AC、BD。

设：AC、BD交于E。

因为：DA等于AB，AC是公共的，

所以：两边DA、AC等于两边BA、AC，且底DC等于底BC，

因此：角DAC等于角BAC，[I. 8]

所以：AC二等分角DAB。

同理可证：角ABC、BCD、CDA的每一个被直线AC、DB二等分。

因为：角DAB等于角ABC，并且角EAB是角DAB的一半，

又因：角EBA是角ABC的一半，

所以：角EAB等于EBA，

所以：边EA等于边EB。[I. 6]

同理可证：线段EA、EB的每一个等于线段EC、ED的每一个，

所以：四条线段EA、EB、EC、ED彼此相等。

以E为圆心，以线段EA、EB、EC、ED之一为半径画圆，必经过其他各点，

所以：它外接于正方形$ABCD$。

设：外接圆是$ABCD$，

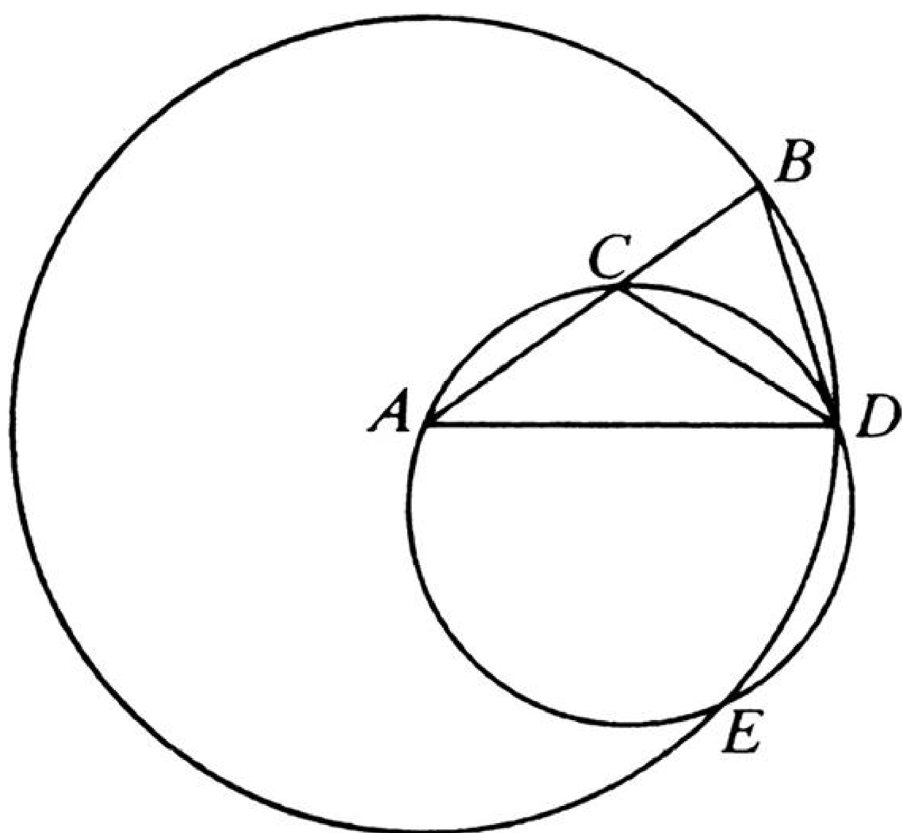
因此：已作一个已知正方形$ABCD$的外接圆。

作完。

命题10

…

求作一个等腰三角形，让它的底角的每一个都是顶角的二倍。



任意取定一条线段*AB*，用点*C*分*AB*，使*AB*、*BC*围成的矩形等于*CA*上的正方形；[II. 11]

以*A*为圆心，以*AB*为半径作圆*BDE*。在圆*BDE*中作拟合线*BD*等于线段*AC*，使它不大于圆*BDE*的直径。[IV. 1]

连接*AD*、*DC*，且令圆*ACD*外接于三角形*ACD*。[IV. 5]

因为：矩形*AB*、*BC*等于*AC*上的正方形，并且*AC*等于*BD*，

所以：矩形*AB*、*BC*等于*BD*上的正方形。

又因：点*B*是在圆*ACD*的外面取的，过*B*作两条线段*BA*、*BD*与圆*ACD*相遇，并且它们中的一条与圆相交，此时另一条落在圆上，

并且矩形*AB*、*BC*等于*BD*上的正方形，

所以：*BD*切于圆*ACD*。[III. 37]

又因：*BD*与它相切，

且*DC*是由切点*D*作的与圆相截的直线，

所以：角*BDC*等于相对弓形上的角*DAC*。[III. 32]

因为：角*BDC*等于角*DAC*，将角*CDA*加在它们各边，

所以：整体角*BDA*等于角*CDA*、*DAC*的和。

又因：外角*BCD*等于角*CDA*、*DAC*的和，[I. 32]

所以：角*BDA*等于角*BCD*。

又因：角*BDA*等于角*CBD*，且边*AD*等于*AB*，[I. 5]

所以：角*DBA*等于角*BCD*，

所以：角*BDA*、*DBA*、*BCD*三个角彼此相等。

因为：角*DBC*等于角*BCD*，

边*BD*等于边*DC*，[I. 6]

又已知*BD*等于*CA*，故*CA*等于*CD*，

所以：角*CDA*等于角*DAC*，[I. 5]

所以：角*CDA*、*DAC*的和是角*DAC*的二倍。

又因：角*BCD*等于角*CDA*、*DAC*的和，

所以：角*BCD*也是角*CAD*的二倍。

因为：角*BCD*等于角*BDA*、*DBA*的每一个，

所以：角*BDA*、*DBA*的每一个也是角*DAB*的二倍。

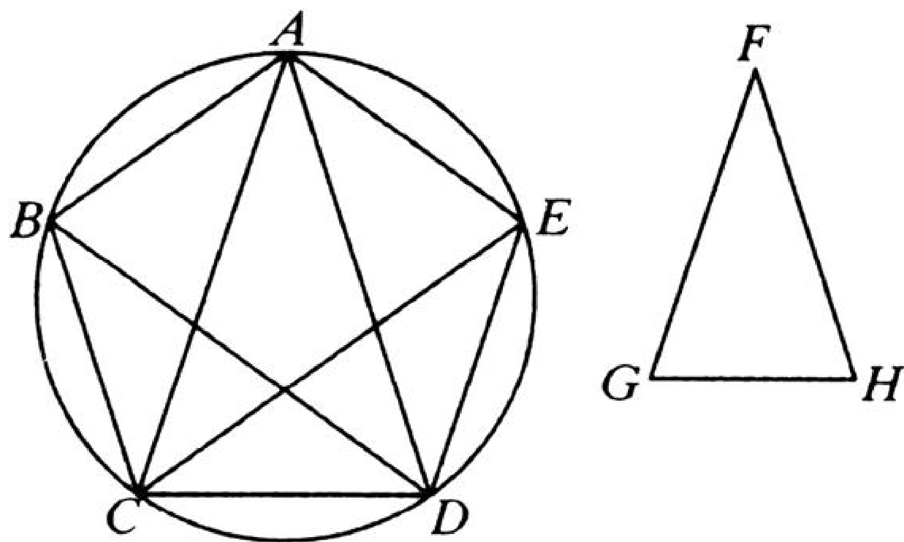
这样一来，作了等腰三角形*ABD*，它的底*DB*上的每个角都等于顶角的二倍。

作完。

命题11

…

求作已知圆的内接等边且等角的五边形。



设：已知圆*ABCDE*。

要求：在圆*ABCDE*内作一个等边且等角的五边形。

设：等腰三角形*FGH*在*G*、*H*处的角的每一个都是*F*处角的二倍。[IV. 10]

首先，在圆*ABCDE*内作一个和三角形*FGH*等角的三角形*ACD*，

由此，角*CAD*等于在*F*的角，

并且在*G*、*H*的角分别等于*ACD*、*CDA*，[IV. 2]

因此：角*ACD*、*CDA*的每一个也是角*CAD*的二倍。

又设：角*ACD*、*CDA*分别被直线*CE*、*DB*二等分。[I. 9]

连接*AB*、*BC*、*DE*、*EA*。

因为：角*ACD*、*CDA*是角*CAD*的二倍，并且它们被直线*CE*、*DB*二等分，

所以：角*DAC*、*ACE*、*ECD*、*CDB*、*BDA*五个角彼此相等。

又因：等角所对的弧也相等，[III. 26]

所以：五段弧*AB*、*BC*、*CD*、*DE*、*EA*彼此相等。

又因：等弧所对的弦也相等，[III. 29]

所以：五条弦*AB*、*BC*、*CD*、*DE*、*EA*彼此相等，

所以：五边形*ABCDE*是等边的。

同时，也可以证明它是等角的。

因为：弧*AB*等于弧*DE*，给它们各边加上*BCD*，

所以：整体弧*ABCD*等于整体的弧*EDCB*。

又因：角*AED*在弧*ABCD*上，并且角*BAE*在弧*EDCB*上，

所以：角*BAE*等于角*AED*。[III. 27]

同理可证：角*ABC*、*BCD*、*CDE*的每一个等于角*BAE*、*AED*的每一个，

所以：五边形*ABCDE*是等角的。

又因：已经证明它是等边的，

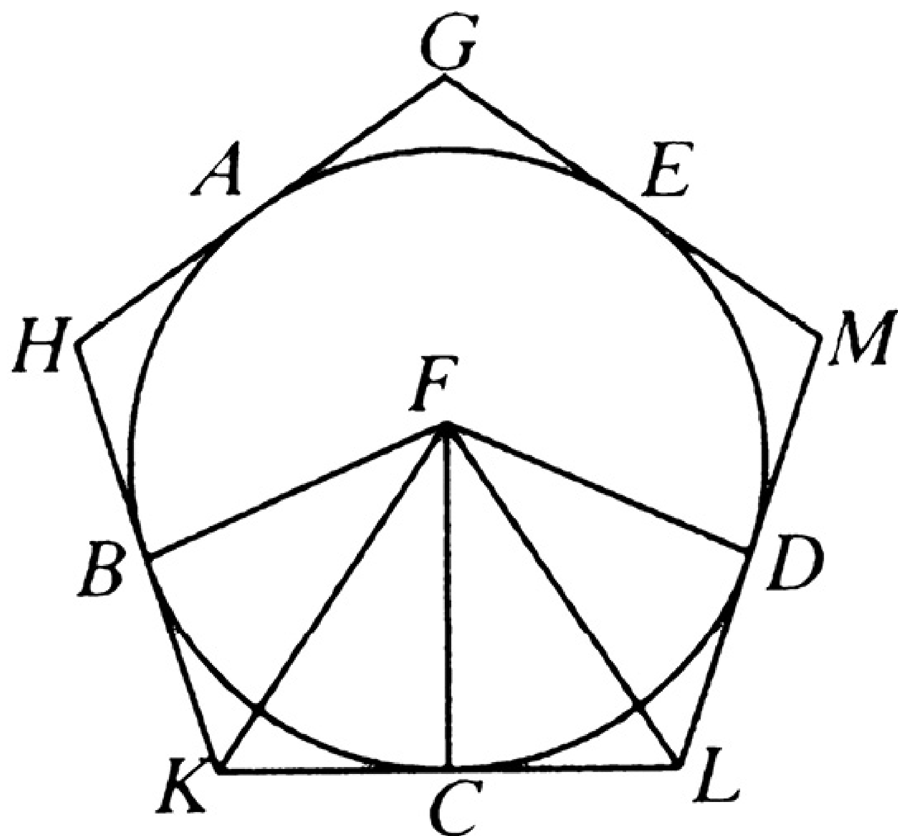
所以：在已知圆内作了一个内接等边且等角的五边形。

作完。

命题12

…

求已知圆的外切等边且等角的五边形。



设：已知圆*ABCDE*。

要求：作圆*ABCDE*的外切等边且等角的五边形。

设：*A*、*B*、*C*、*D*、*E*是内接五边形的顶点，这样弧*AB*、*BC*、*CD*、*DE*、*EA*相等。[IV. 11]

经过*A*、*B*、*C*、*D*、*E*作圆的切线*GH*、*HK*、*KL*、*LM*、*MG*。[III.

16，推论]

设：*F*是圆*ABCDE*的圆心。[III. 1]

连接*FB*、*FK*、*FC*、*FL*、*FD*。

因为：直线*KL*切圆*ABCDE*于*C*，且从圆心*F*到切点*C*的连线为*FC*，

那么：*FC*垂直于*KL*，[III. 18]

所以：在点*C*的每个角都是直角。

同理可证：在点*B*、*D*的角也是直角。

又因：角*FCK*是直角，

所以：在*FK*上的正方形等于*FC*、*CK*上的正方形的和。[I. 47]

同理可证：*FK*上的正方形等于*FB*、*BK*上的正方形的和，

所以：*FC*、*CK*上的正方形的和等于*FB*、*BK*上的正方形的和。

因为：其中在*FC*上的正方形等于*FB*上的正方形，

因此：其余的*CK*上的正方形等于*BK*上的正方形，

所以：*BK*等于*CK*。

因为：*FB*等于*FC*，并且*FK*是公共的，两边*BF*、*FK*等于两边*CF*、*FK*，并且底*BK*等于底*CK*，

所以：角*BFK*等于角*KFC*。[I. 8]

又因：角*BKF*等于角*FKC*，

所以：角*BFC*是角*KFC*的二倍，角*BKC*是角*FKC*的二倍。

同理可证：角*CFD*也是角*CFL*的二倍，并且角*DLC*也是角*FLC*的二倍。

因为：弧BC等于弧CD，角BFC等于角CFD，[III. 27]

又因：角BFC是角KFC的二倍，并且角DFC是角LFC的二倍，

所以：角KFC等于角LFC。

因为：角FCK等于角FCL，

所以：在FKC、FLC两个三角形中，它们有两个角等于两个角，又有一边等于一边，也就是它们的公共边FC，

所以：它们其余的边等于其余的边，其余的角等于其余的角，[I. 26]

所以：线段KC等于线段CL，并且角FKC等于角FLC。

又因：KC等于CL，

所以：KL是KC的二倍。

同理可证：HK等于BK的二倍。

又因：BK等于KC，

因此：HK等于KL。

同理可证：线段HG、GM、ML的每一条也可以被证明等于线段HK、KL的每一条，

所以：五边形$GHKLM$是等边的。

其次，也可以证明它是等角的。

由于：角FKC等于角FLC，并且已经证明了角HKL是角FKC的二倍，

又因：角KLM是FLC的二倍，

因此：角HKL等于角KLM。

同理可证：角KHG、HGM、GML的每一个等于角HKL、KLM的每一

个，

因此：角*GHK*、*HKL*、*KLM*、*LMG*、*MGH*，五个角彼此相等，

因此：五边形*GHKLM*是等角的。

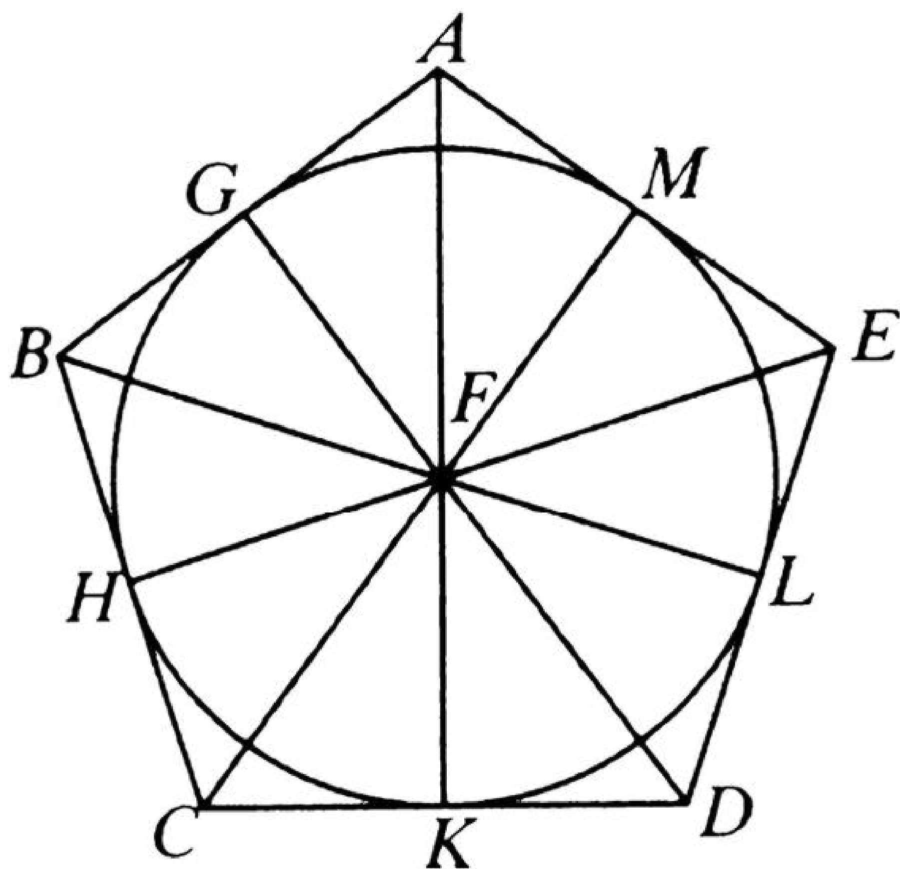
由于前面已证它是等边的，并且外切于圆*ABCDE*。

作完。

命题13

…

已知一个边相等且角相等的五边形，求作它的内切圆。



设：已知等边且等角的五边形$ABCDE$。

要求：作五边形$ABCDE$的内切圆。

将角BCD、CDE分别用直线CF、DF二等分，并且直线CF、DF相交于点F。

连接线段FB、FA、FE。

因此：BC等于CD，并且CF是公共的，两边BC、CF等于两边DC、CF，并且角BCF等于角DCF，

所以：底BF等于底DF，三角形BCF全等于三角形DCF，并且其余的角等于其余的角，

也就是等边所对的角，[I. 4]

因此：角CBF等于角CDF。

因为：角CDE是角CDF的二倍，并且角CDE等于角ABC，

又因：角CDF等于角CB，

因此：角CBA也是角CBF的二倍，

所以：角ABF等于角FBC，

所以：角ABC被直线BF二等分。

同理可证：角BAE、AED分别被直线FA、FE二等分。

从点F作FG、FH、FK、FL、FM垂直于直线AB、BC、CD、DE、EA。

因为：角HCF等于角KCF，并且直角FHC等于角FKC，

所以：FHC、FKC是有两个角等于两个角，且一条边等于一条边的两个三角形，也就是FC是它们的公共边，且都是等角所对的边，

所以：它们的其余边等于其余的边，[I. 26]

所以：垂线*FH*等于垂线*FK*。

同理可证：线段*FL*、*FM*、*FG*的每一条等于线段*FH*、*FK*的每一条，

因此：五条线段*FG*、*FH*、*FK*、*FL*、*FM*彼此相等，

所以：以*F*为圆心，以线段*FG*、*FH*、*FK*、*FL*、*FM*之一为半径作圆，也经过其他各点，并且必定切于直线*AB*、*BC*、*CD*、*DE*、*EA*。

这是因为，在点*G*、*H*、*K*、*L*、*M*处的角是直角。

若它不切于它们，而与它们相截。

则过圆的直径的端点和直径成直角的直线就落在圆内，

这是不符合常理的，[III. 16]

所以：以*F*为圆心，以线段*FG*、*FH*、*FK*、*FL*、*FM*之一为半径所作的圆与直线*AB*、*BC*、*CD*、*DE*、*EA*不相截，因此相切。

设：画出的内切圆是*GHKLM*，

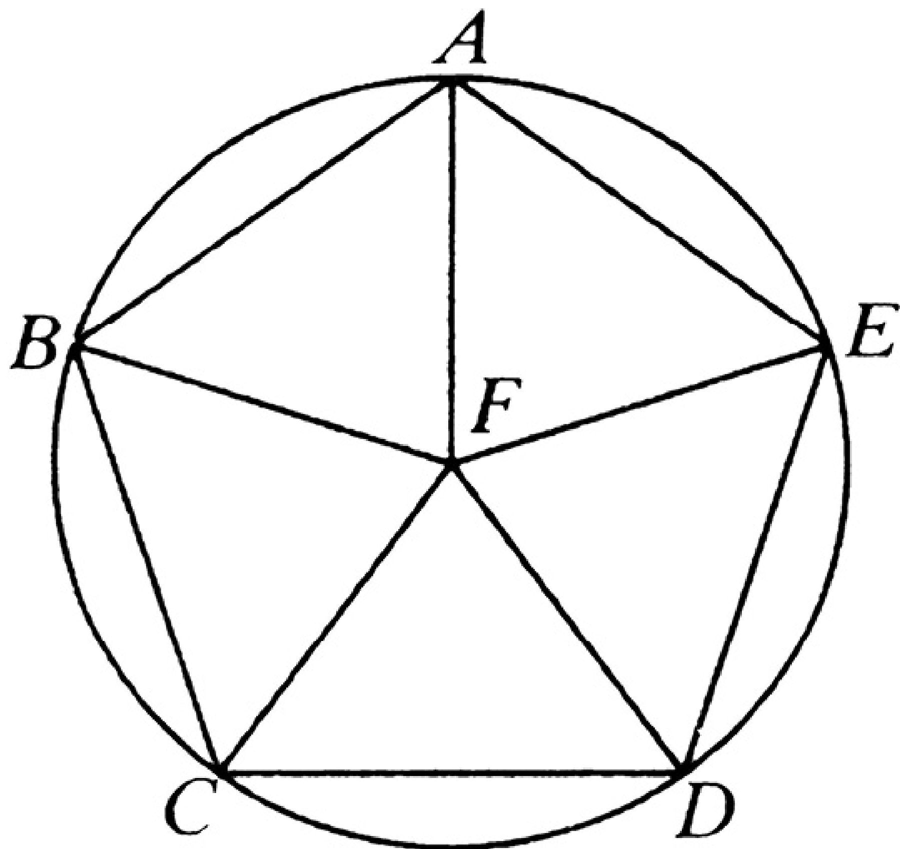
所以：在已知等边且等角的五边形内作了内切圆。

作完。

命题14

…

已知等边且等角的五边形，求作它的外接圆。



设：等边且等角的五边形为*ABCDE*。

要求：作五边形*ABCDE*的外接圆。

设：角*BCD*、*CDE*分别被直线*CF*、*DF*二等分，由二直线的交点*F*到点*B*、*A*、*E*连线段*FB*、*FA*、*FE*。

按照前面的方式可以证明：角*CBA*、*BAE*、*AED*分别被直线*FB*、*FA*、*FE*二等分。

因为：角*BCD*等于角*CDE*，并且角*FCD*是角*BCD*的一半，角*CDF*是角*CDE*的一半，

因此：角*FCD*等于角*CDF*。

所以：边*FC*等于边*FD*。[I. 6]

同理可证：线段FB、FA、FE的每一条等于线段FC、FD的每一条，

因此：五条线段FA、FB、FC、FD、FE彼此相等。

所以：以F为圆心，以FA、FB、FC、FD、FE之一为半径作圆也经过其余的点，并且是外接的。

设：外接圆为$ABCDE$，

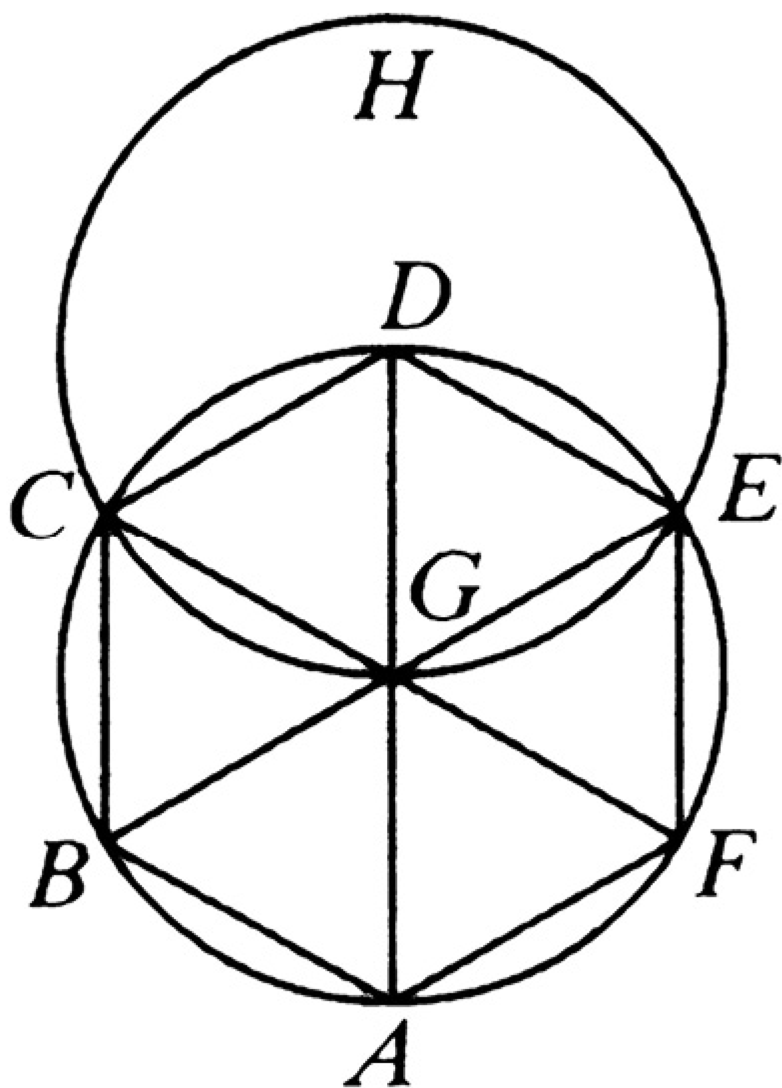
所以：对已知等边且等角的五边形，已作了它的外接圆。

作完。

命题15

…

在已知圆内作一个等边且等角的内接六边形。



设：已知圆*ABCDEF*。

要求：在圆*ABCDEF*内作一个等边且等角的内接六边形。

作圆*ABCDEF*的直径*AD*；

设：圆心为*G*，又以*D*为圆心，并且以*DG*为距离作圆*EGCH*。

连接*EG*、*CG*，延长经过点*B*、*F*；

又连接*AB*、*BC*、*CD*、*DE*、*EF*、*FA*。

那么可以说：六边形*ABCDEF*是等边且等角的。

因为：点*G*是圆*ABCDEF*的圆心，*GE*等于*GD*，

又因：点*D*是圆*GCH*的圆心，*DE*等于*DG*，

已经证明了*GE*等于*GD*，因此：*GE*等于*ED*，

并且在等腰三角形中，底上的两个角是彼此相等的，[I. 5]

所以：三角形*EGD*是等边的，并且角*EGD*、*GDE*、*DEG*是彼此相等的。

因为：三角形的三个角的和等于两直角，[I. 32]

所以：角*EGD*是两直角的三分之一。

同理可证：角*DGC*是两直角的三分之一。

又因：直线*CG*与*EB*所成的邻角*EGC*、*CGB*的和等于两直角，

因此：其余的角*CGB*等于两直角的三分之一，

所以：角*EGD*、*DGC*、*CGB*彼此相等，

所以：它们的顶角*BGA*、*AGF*、*FGE*相等，[I. 15]

因此：角*EGD*、*DGC*、*CGB*、*BGA*、*AGF*、*FGE*，六个角彼此相等。

因等角所对的弧相等，[III. 26]

所以：六段弧*AB*、*BC*、*CD*、*DE*、*EF*、*FA*彼此相等。

因为：等弧所对的弦相等，[III. 29]

所以：六条弦彼此相等，

因此：六边形*ABCDEF*是等边的。

同时，可以证明它是等角的。

由于：弧*FA*等于弧*ED*，将弧*ABCD*加在它们各边，

所以：整体*FABCD*等于整体*EDCBA*。

又因：角*FED*对着弧*FABCD*，并且角*AFE*对着弧*EDCBA*，

因此：角*AFE*等于角*DEF*。[III. 27]

同理可证：六边形*ABCDEF*其余的角等于角*AFE*、*FED*的每一个，

所以：六边形*ABCDEF*是等角的。

又因：已经证明它是等边的，它也内接于圆*ABCDEF*，

所以：在已知圆内作了等边且等角的内接六边形。

作完。

推论 由上命题可得，此六边形的边等于圆的半径。

假如经过圆上分点作圆的切线，就可以得到圆的一个等边且等角的外切六边形，这与五边形情况的解释是一样的。

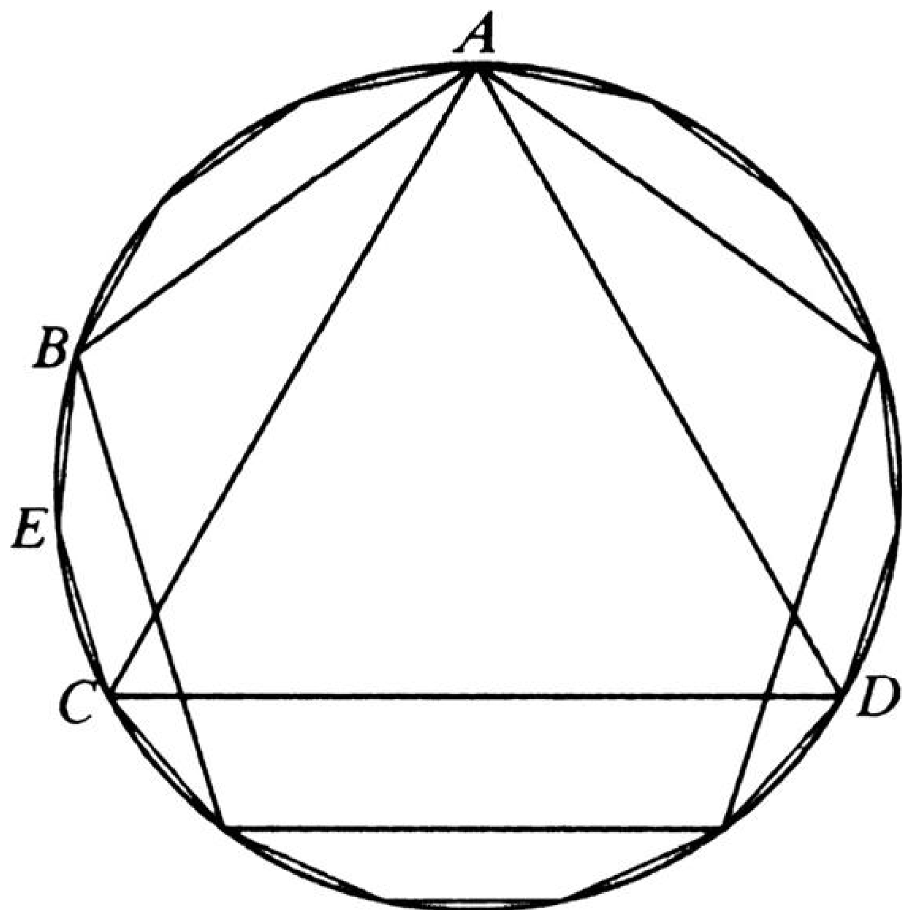
并且，根据类似五边形的情况，可以作给定的六边形的内切圆和外接圆。

作完。

命题16

…

在已知圆内作一个等边且等角的内接十五角形。



设：已知圆*ABCD*。

要求：在圆*ABCD*内求作一个等边且等角的内接十五角形。

设：*AC*为圆*ABCD*内接等边三角形的一边，*AB*为等边五边形的一边。

那么：在圆*ABCD*内就有相等的线段十五条；在弧*ABC*上有五条，并且此弧是圆的三分之一；在弧*AB*上有三条，此弧是圆的五分之一，

因此：余下的*BC*上有两条相等的弧。[III. 30]

令*E*二等分弧*BC*，

那么：弧*BE*、*EC*的每一条是圆*ABCD*的十五分之一。

若连接BE、EC，并且在圆$ABCD$内适当地截出等于它们的线段，就可以作内接于它的边相等且角相等的十五角形。

作完。

又，和五边形的情况相同，若过圆上的分点作圆的切线，就可以作圆的一个等边且等角的外切十五边形。

进一步推断，类似于五边形的情况，可以同时作已知的一个（等边且等角的）十五边形的内切圆与外切圆。

卷V

定义

01　当一个较小量能量尽一个较大量时，称较小量是较大量的一部分。

02 当一个较大量能被较小量量尽时，较大量叫作较小量的倍量。

03 比是两个同类量之间的一种大小关系。

04 若把一个量几倍以后能大于另外一个量，则称这两个量彼此之间有一个比。

05 有四个量，第一量比第二量与第三量比第四量叫作有相同比，如果对第一与第三个量取任意同倍数，又对第二与第四个量取任意同倍数，而第一与第二倍量之间依次有大于、等于或小于的关系，那么第三与第四倍量之间就有相应的关系。

06 有相同比的四个量叫作成比例的量。

07 在四个量之间，第一、第三两个量取相同的倍数，又第二、第四两个量取另一相同的倍数，如果第一个的倍量大于第二个的倍量，而第三个的倍量不大于第四个的倍量时，则称第一量与第二量的比大于第三量与第四量的比。

08 一个比例至少要有三项。

09 当三个量成比例时，则称第一量与第三量的比是第一量与第二量的二次比。

10 当四个量成（连）比例时，则称第一量与第四量的比为第一量与第二量的三次比。不论有几个量成连比都依次类推。

11 在成比例的四个量中，将前项与前项且后项与后项叫作对应量。

12 更比例是前项比前项且后项比后项。

13 反比例是后项作前项，前项作后项。

14 合比例是前项与后项的和比后项。

15 分比例是前项与后项的差比后项。

16 换比例是前项比前项与后项的差。

17 首末比例是指，有一些量又有一些与它们个数相等的量，如果在各组中每取相邻二量成相同的比例，则第一组量中首量比末量如同第二组中首量比末量。

18 或者，换言之，去掉中间项，保留两头的项。

19 波动比例是，有三个量，又有另外与它们个数相等的三个量，在第一组量里前项比中项如同第二组量里中项比后项，这时，第一组量里的中项比后项如同第二组量里前项比中项。

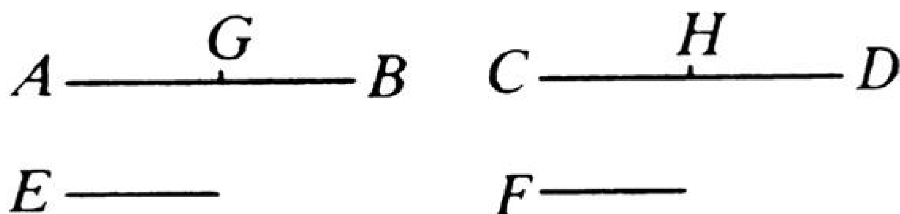
命题

命题1

…

假如有任意多个量，分别是同样多个量的同倍数量。

那么无论这个倍数是多少，前者之和也是后者之和的同倍数量。



设：量AB、CD分别是个数与它们相等的量E、F的同倍数量。

那么可以说：无论AB是E的多少倍，AB、CD的和也是E、F的和的同样多少倍。

因为：AB是E的倍量，CD是F是的倍量，它们的倍数相等，

所以：在AB中有多少个等于E的量，也在CD中同样有多少个等于F的量。

设：AB被分成等于E的量AG、GB，且CD被分成等于F的量CH、HD。

那么：量AG、GB的个数等于量CH、HD的个数。

因为：AG等于E，CH等于F，

所以：AG等于E，且AG、CH的和等于E、F的和。

同理可证：GB等于E，且GB、HD的和等于E、F的和，

所以：在AB中有多少个等于E的量，

在AB、CD的和中也有同样多少个量等于E、F的和，

因此：不论AB是E的多少倍，AB、CD的和也是E、F的和的同样多少倍。

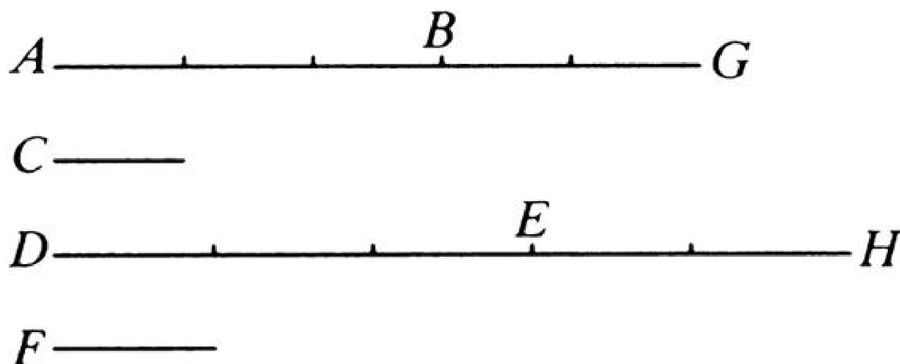
证完。

命题2

…

假如第一量是第二量的倍量，第三量是第四量的倍量，其倍数相等；而第五量是第二量的倍量，第六量是第四量的倍量，其倍数相等。

则第一量与第五量的和是第二量的倍量，第三量与第六量的和是第四量的倍量，其倍数相等。



设：第一量AB是第二量C的倍量，第三量DE是第四量F的倍量，它们的倍数相等；

第五量BG是第二量C的倍量，第六量EH是第四量F的倍量，它们的倍数相等。

那么可以说：第一量与第五量的和AG是第二量C的倍量，第三量与第六量的和DH是第四量F的倍量，它们的倍数相等。

因为：AB是C的倍量，DE是F的倍量，它们的倍数相等，

所以：在AB中存在多少个等于C的量，也在DE中存在同样多少个等于F的量。

同理可证：在BG中存在多少个等于C的量，也在EH中存在同样多少个等于F的量，

所以：无论AG是C的几倍，DH也是F的几倍，

因此：第一量与第五量的和AG是第二量C的倍量，第三量与第六量的和DH是第四量F的倍量，其倍数相等。

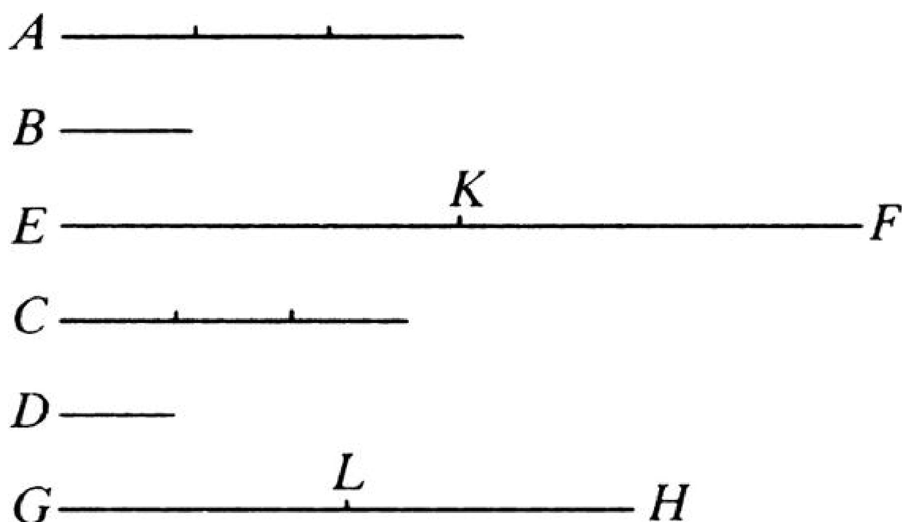
证完。

命题3

…

假如第一量是第二量的倍量，第三量是第四量的倍量，它们的倍数相等；

假如再有同倍数的第一量及第三量，那么同倍后的这两个量分别是第二量及第四量的倍量，且这两个倍数相等。



设：第一量A是第二量B的倍量，第三量C是第四量D的倍量，它们的倍数相等。

且取定A、C的等倍量EF、GH。

那么可以说：EF是B的倍量，GH是D的倍量，它们的倍数相等。

因为：EF是A的倍量，GH是C的倍量，它们的倍数相等，

所以：在EF中存在多少个等于A的量，也在GH中存在多少个等于C的量。

设：EF被分成等于A的量EK、KF；

又GH被分成等于C的量GL、LH。

那么：量EK、KF的个数等于量GL、LH的个数。

因为：A是B的倍量，C是D的倍量，它们的倍数相等，

此时：EK等于A，并且GL等于C，

所以：EK是B的倍量，GL是D的倍量，它们的倍数相等。

同理可证：KF是B的倍量，LH是D的倍量，其倍数相等，

因此：第一量EK是第二量B的倍量，第三量GL是第四量D的倍量，它们的倍数相等。

又因：第五量KF是第二量B的倍量，第六量LH是第四量D的倍量，它们的倍数也相等，

因此：第一量与第五量的和EF是第二量B的倍量，第三量与第六量的和GH是第四量D的倍量，它们的倍数相等。[V. 2]

证完。

命题4

…

假如第一量比第二量与第三量比第四量有相同的比，取第一量与第三量的任意同倍数量，再取第二量与第四量的任意同倍数量，那么按原顺序它们仍有相同的比。

A

B

E

G

K

M

C

D

F

H

L

N

设：第一量A比第二量B与第三量C比第四量D有相同的比。

那么：取A、C的等倍数量为E、F。

又取B、D的等倍数量为G、H。

那么可以说：E比G相当于F比H。

设：E、F的同倍量为K、L，G、H的同倍量为M、N。

因为：E是A的倍量，F是C的倍量，它们的倍数相同，

再取定E、F的同倍量K、L，

所以：K是A的倍量，L是C的倍量，它们的倍数相同。[V. 3]

同理可证：M是B的倍量，N是D的倍量，它们的倍数相同。

因为：A比B如同C比D，并且K、L是A、C的同倍量，

又有，M、N是B、D的同倍量，

所以：若M大于K、N大于L，

若M等于K，N等于L，

若M小于K，N小于L。[V. 定义5]

又，K、L是E、F的同倍量，

且M、N是G、H的同倍量，

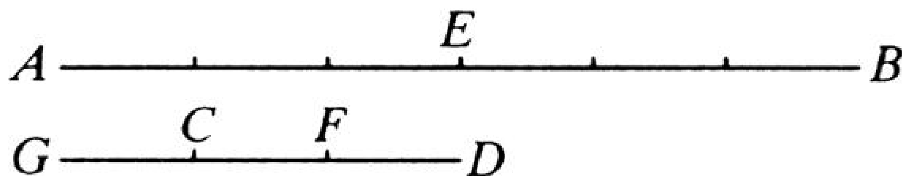
所以：E比G相当于F比H。[V. 定义5]

证完。

命题5

…

假如一个量是另一个量的倍量，并且第一个量减去的部分是第二个量减去的部分的倍量，它们的倍数相等。那么剩余部分是剩余部分的倍量，整体是整体的倍量，其倍数相等。



假设：量AB是量CD的倍量，部分AE是部分CF倍量，它们的倍数相等。

那么可以说：剩余量EB是剩余量FD的倍量，整体AB是整体CD的倍量，它们的倍数相等。

由于：不管AE是CF的多少倍，可设EB也是CG的同样多少倍，

故：AE是CF的倍量，EB是GC的倍量，它们的倍数相等，

那么：AE是CF的倍量，AB是GF的倍量，它们的倍数相等。[V. 1]

根据假设：AE是CF的倍量，AB是CD的倍量，它们的倍数相等，

因此：AB是量GF、CD的每一个的倍量，它们的倍数相等，

所以：GF等于CD。

假设：以上每个减去CF，余量GC等于余量FD。

因为：AE是CF的倍量，EB是GC的倍量，它们的倍数相等。并且GC等于DF，

因此：AE是CF的倍量，EB是FD的倍量，它们的倍数相等。

根据假设：AE是CF的倍量，AB是CD的倍量，它们的倍数相等，

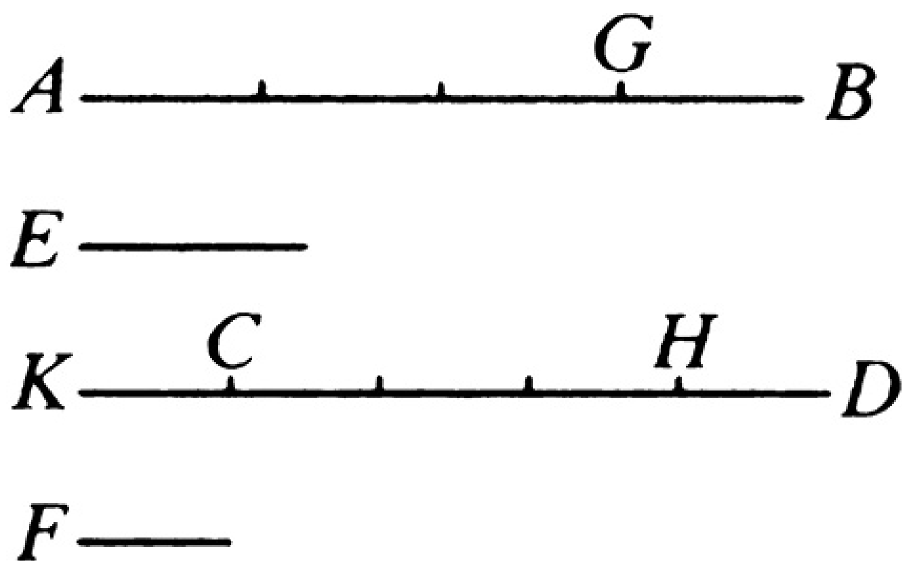
所以：余量EB是余量FD的倍量，整体AB是整体CD的倍量，它们的倍数相等。

证完。

命题6

…

假如两个量是另外两个量的相同倍量，并且由前两个量减去后两个量的任意相同的倍量。那么剩余两个量要么与后两个量相等，要么是它们的同倍量。



设：两个量*AB*、*CD*是两个量*E*、*F*的同倍量，由前二量减去*E*、*F*的同倍量*AG*、*CH*。

那么可以说：余量*GB*、*HD*要么等于*E*、*F*，要么是它们的同倍量。

设：*GB*等于*E*，

那么可以说：*HD*等于*F*。

因为：可以作*CK*等于*F*，

又因：*AG*是*E*的倍量，*CH*是*F*的倍量，它们的倍数相等，

此时*GB*等于*E*，并且*KC*等于*F*，

所以：*AB*是*E*的倍量，*KH*是*F*的倍量，它们的倍数相等。[V. 2]

又因，根据假设：*AB*是*E*的倍量，*CD*是*F*的倍量，它们的倍数相等，

因此：*KH*是*F*的倍量，*CD*是*F*的倍量，它们的倍数相等，

那么：量*KH*、*CD*的每一个都是*F*的同倍量，

因此：*KH*等于*CD*。

由上面每个量减去CH，

所以：余量KC等于余量HD。

因为：F等于KC，

所以：HD等于F，

因此：假如GB等于E，HD就等于F。

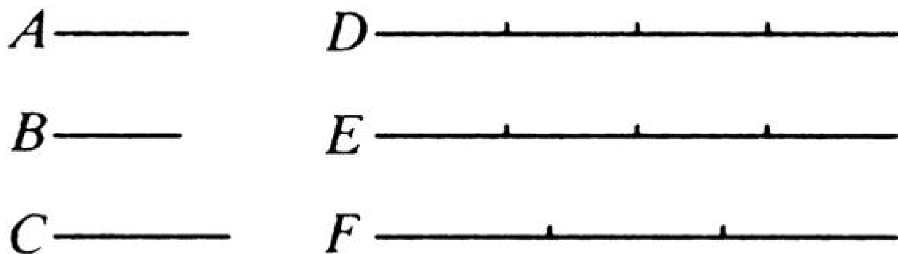
同理可证：假如GB是E的倍量，那么HD也是F的同倍量。

证完。

命题7

…

相等的量比同一个量，它们的比相同；同一个量比相等的量，它们的比相同。



设：A、B是相等的量，并且C是另外任意量。

那么可以说：A、B的每一个与量C相比，它们的比相同；

并且量C比量A、B的每一个，它们的比都相同。

设：取定A、B的等倍量D、E，另外一个量C的倍量为F。

因为：D是A的倍量，E是B的倍量，它们的倍数相等，

且此时A等于B，

所以：D等于E。

又因：F是另外的任意量，

若D大于F，E大于F，

若前二者相等，后二者也相等，

若D小于F，E小于F。

又因：D、E是A、B的同倍量，此时，F是量C的任意倍量，

因此：A比C如同B比C。[V. 定义5]

同时，可以证明，量C比量A、B，它们的比相同。

因为：可用相同的作图，可以证明D等于E，且F是某个另外的量，

若F大于D，F大于E，

若F等于D，那么F就等于E，

若F小于D，那么F小于E。

又因：F是C的倍量，此时，D、E是A、B另外的倍量，

因此：C比A如同C比B。[V. 定义5]

证完。

推论 由此可得，假如任意的量成比例，那么它们的反比也成比例。

命题8

…

有不相等的二量与同一量相比，较大的量比这个量大于较小的量比这个

量；反之，这个量比较小的量大于这个量比较大的量。

设：AB、C是不相等的量，并且AB是较大者，而D是另外任意给定的量。

那么可以说：AB与D的比大于C与D的比，

并且D与C的比大于D与AB的比。

因为：AB大于C，取BE等于C，

所以：假如对量AE、EB中较小的一个量，加倍至一定倍数后它就大于D。[V. 定义4]

【情况1】

先设：AE小于EB，加倍AE，令FG是AE的倍量，且大于D。

那么：无论FG是AE的几倍，就取GH为EB同样的倍数，并且取K为C同样的倍数。

让L是D的二倍，M是它的三倍，并且一个个逐倍增加，直到D递加到首次大于K为止。

设：它已被取顶为N，是D的四倍，这是首次大于K的倍量。

所以：K是首次小于N的量，

因此：K不小于M。

又因：FG是AE的倍量，GH是EB的倍量，它们的倍数相等，

所以：FG是AE的倍量，FH是AB的倍量，它们的倍数相等。[V. 1]

因为：FG是AE的倍量，K是C的倍量，它们的倍数相等，

所以：FH是AB的倍量，K是C的倍量，它们的倍数相等，

因此：FH、K是AB、C的同倍量。

因为：GH是EB的倍量，K是C的倍量，它们的倍数相等，且EB等于C，

所以：GH等于K。

又因：K不小于M，

所以：GH也不小于M。

因为：FG大于D，

所以：整体FH大于D与M的和。

因为：D与M的和等于N，

所以：M是D的三倍。

又因：M、D的和是D的四倍，且N也是D的四倍，

所以：可以得到M、D的和等于N。

又因：FH大于M与D的和，

所以：FH大于N，

此时K不大于N。

因为：FH、K是AB、C的同倍量，N是另外任意取定的D的倍量，

所以：AB比D大于C比D。[V. 定义7]

同时，可以证明D比C大于D比AB。

用同样的作图可以证明，N大于K，此时N不大于FH。

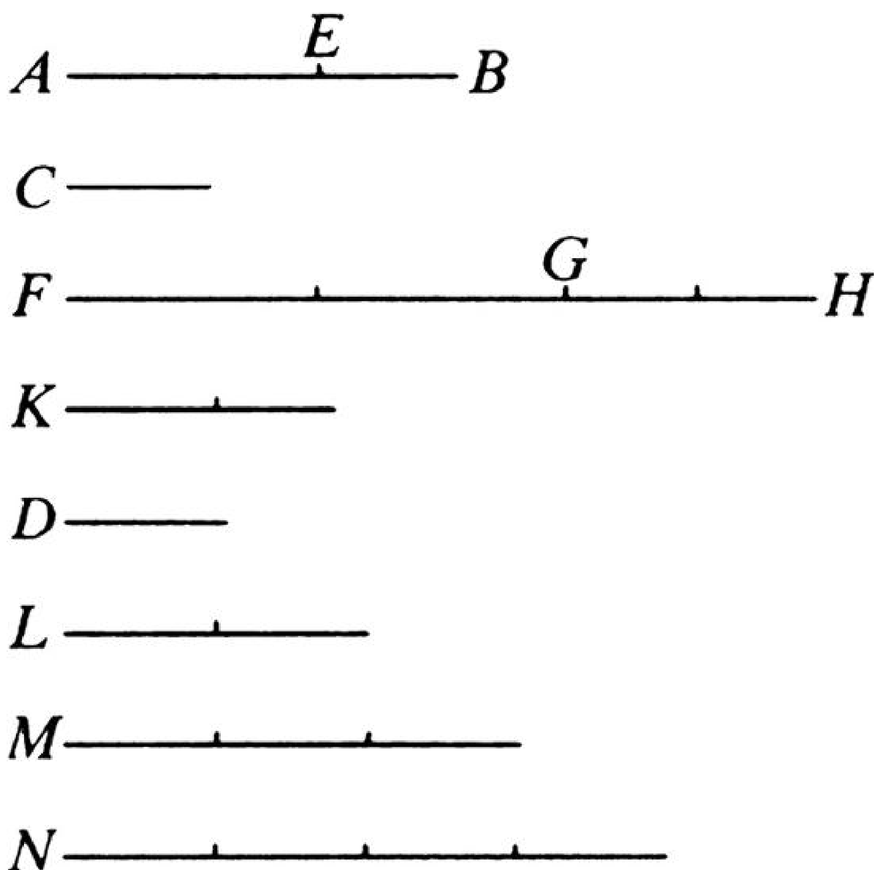
因为：N是D的倍量，

此时FH、K是AB、C的另外任意取定的同倍量，

所以：D比C大于D比AB。[V. 定义7]

【情况2】

设：AE大于EB；



那么：加倍较小的量EB到一定倍数，一定会大于D。[V. 定义4]

设：加倍后的GH是EB的倍量并且大于D；

因为：无论GH是EB的多少倍，都取FG是AE的同样多少倍，K是C的同样多少倍，

所以：可以证明，FH、K是AB、C的同倍量。

同理假设：D的第一次大于FG的倍量为N，这样FG不再小于M。

又因：GH大于D，

所以：整体FH大于D、M的和，也就是大于N。

又因：K不大于N，

所以：FG大于GH，也就是大于K，不大于N。

同理，可以将之后的论证补充完整。

证完。

命题9

…

几个量与同一个量的比相同，那么这些量彼此相等；并且同一个量与几个量的比相同，那么这些量相等。

A ——————————

B ——————————

C ——————————————

设：量A、B各与C成相同的比。

那么可以说：A等于B。

若非如此，则量A、B各与C的比不相同。[V. 8]

又因：已知它们有相同的比，

所以：A等于B。

假如：C与量A、B的每一个成相同的比。

那么可以说：A等于B。

若非如此，则C与量A、B的每一个成不相同的比。[V. 8]

又因：已知它们成相同的比，

所以：A等于B。

证完。

命题10

…

一些量比同一量，比大者，该量也大；并且同一量比一些量，比大者，该量较小。

设：A比C大于B比C。

那么可以说：A大于B。

若非如此，那么要么A等于B，要么A小于B。

先设：A等于B。

因为：在这种假设下，已知量A、B的每一个比C都有相同的比，[V. 7]

但它们的比并不相同，

因此：A不等于B。

因为：在这种情况下，A比C小于B比C，[V. 8]

但是不符合已知条件，

所以：A也不小于B。

又因：已经证明了二者不相等，

所以：A大于B。

再设：C比B大于C比A。

那么可以说：B小于A。

因为：若非如此，那么要么相等，要么大于，

设：B不等于A。

在这种情况下，C比量A、B的每一个都有相同的比，[V. 7]

但是不符合已知条件，

所以：A不等于B。

也不是B不大于A；这是因为：在这种情况下，C比B小于C比A，[V. 8]

但是不符合已知条件，

所以：B也不大于A。

又因：已经证明了一个并不等于另一个，

所以：B小于A。

证完。

命题11

…

凡是与同一个比相同的比，它们彼此也相同。

A C E
B D F
G H K
L M N

设：A比B如同C比D，C比D如同E比F。

那么可以说：A比B如同E比F。

因为：可以取A、C、E的同倍量为G、H、K，又任意取定B、D、F的同倍量L、M、N，

因为：A比B如同C比D，

又因：已经取定了A、C的同倍量G、H，

并且任意取定了B、D的同倍量L、M，

因此：假如G大于L，那么H大于M。

假如前二者相等，那么后二者也相等；假如G小于L，那么H小于

M，

又因：C比D如同E比F，并且已取定了C、E的同倍量H、K，

又任意取定了D、F的同倍量M、N，

所以：假如H大于M，那么K大于N；假如前二者相等，那么后二者也相等；假如H小于M，那么K小于N。

又因：如果H大于M，那么G大于L，

假如前二者相等，那么后二者也相等；假如H小于M，那么G小于L，

所以：假如G大于L，那么K大于N。

假如前二者相等，那么后二者也相等；假如G小于L，那么K小于N，

又因：G、K是A、E的同倍量，

且L、N是任意给定的B、F的同倍量，

所以：A比B如同E比F。

证完。

命题12

…

假如有任意多个量成比例，那么其中一个前项比相应的后项，又如同所有前项的和比所有后项的和。

设：任意多个量A、B、C、D、E、F成比例，即A比B如同C比D，又如同E比F。

那么可以说：A比B如同A、C、E的和比B、D、F的和。

取A、C、E的同倍量G、H、K。

并且另外任意取B、D、F的同倍量L、M、N。

因为：A比B如同C比D，也如同E比F，

且已经取定了A、C、E的同倍量G、H、K，

又因：取定B、D、F的同倍量L、M、N，

所以：假如G大于L，那么H大于M，且K大于N，

假如前二者相等，那么后二者也相等；假如G小于L，那么H小于M，且K小于N。

由此，进一步可得：

假如G大于L，那么G、H、K的和大于L、M、N的和，

假如前二者相等，那么后二者的和也相等，

假如G小于L，那么G、H、K的和小于L、M、N的和。

此时：G与G、H、K的和是A与A、C、E的和的同倍量。

因为：假如有任意多个量，分别是同样多个量的同倍量，

所以：无论那些个别量的倍数是多少，前者的和也是后者的和的同倍量。[V. 1]

同理可证：L与L、M、N的和也是B与B、D、F的和的同倍量，

所以：A比B如同A、C、E的和比B、D、F的和。[V. 定义5]

证完。

命题13

…

假如第一量比第二量与第三量比第四量有相同的比，同时第三量与第四量的比大于第五量与第六量的比，那么第一量与第二量的比大于第五量与第六量的比。

设：第一量A比第二量B与第三量C比第四量D，有相同的比；

且第三量C与第四量D的比大于第五量E与第六量F的比。

那么可以说：第一量A与第二量B的比大于第五量E与第六量F的比。

因为：有C、E的某个同倍量，并且D、F有另外任意给定的同倍量，让C的倍量大于D的倍量，

同时，E的倍量不大于F的倍量，[V. 定义7]

设：它们已经被取定，

让G、H是C、E的同倍量，K、L是另外任意给定的D、F的同倍量，

因此：G大于K，但是H不大于L。

因为：无论G是C的几倍，设M也是A的几倍，

且无论K是D的几倍，设N也是B的几倍，

又因：A比B如同C比D，

且已经取定A、C的同倍量M、G，

并且，另外任意给定B、D的同倍量N、K。

所以：假如M大于N，那么G大于K。

假如前二者相等，那么后二者也相等。

设M小于N，那么G小于K。[V. 定义5]

又因：G大于K，

所以：M大于N。

因为：H不大于L，

并且M、H是A、E的同倍量，

又因：对N、L另外任意取定同倍量B、F，

所以：A比B大于E比F。[V. 定义7]

证完。

命题14

…

假如第一量比第二量与第三量比第四量有相同的比，并且第一量大于第

三量，那么第二量大于第四量；假如前二量相等，那么后二量也相等；假如第一量小于第三量，那么第二量小于第四量。

A C

B D

设：第一量A比第二量B与第三量C比第四量D有相同的比，其中A大于C。

那么可以说：B大于D。

因为：A大于C，并且B是另外任意的量；

所以：A比B大于C比B。[V. 8]

又因：A比B如同C比D，

所以：C比D大于C比B，[V. 13]

又因：同一量与二量相比，比大者，该量反而小，[V. 10]

所以：D小于B。

因此：B大于D。

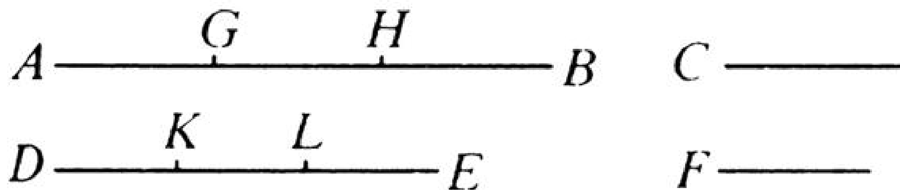
同理可证：假如A等于C，则B等于D；并且假如A小于C，则B小于D。

证完。

命题15

…

部分与部分的比按相应的顺序与它们同倍量的比相同。



设：*AB*是*C*的倍量，*DE*是*F*的倍量，它们的倍数相同。

那么可以说：*C*比*F*如同*AB*比*DE*。

因为：*AB*是*C*的倍量，*DE*是*F*的倍量，它们的倍数相同，

所以：在*AB*中存在着多少个等于*C*的量，就在*DE*中也存在着同样多少个等于*F*的量。

设：将*AB*分成等于*C*的量*AG*、*GH*、*HB*。

并且将*DE*分成等于*F*的量*DK*、*KL*、*LE*。

因为：量*AG*、*GH*、*HB*的个数等于量*DK*、*KL*、*LE*的个数，

又因：*AG*、*GH*、*HB*彼此相等，并且*DK*、*KL*、*LE*也彼此相等，

所以：*AG*比*DK*如同*GH*比*KL*，也如同*HB*比*LE*，[V. 7]

因此：其中一个前项比一个后项如同所有前项的和比所有后项的和，[V. 12]

因此：*AG*比*DK*如同*AB*比*DE*。

又因：*AG*等于*C*且*DK*等于*F*，

所以：*C*比*F*如同*AB*比*DE*。

证完。

命题16

…

假如四个量成比例，那么它们的更比例也成立。

设A、B、C、D是四个成比例的量，则A比B如同C比D。

那么可以说：它们的更比例也成立。

也就是，A比C如同B比D。

取定A、B的同倍量E、F，

并另外任意取定C、D的同倍量G、H。

因为：E是A的倍量，F是B的倍量，它们的倍数相同。并且部分与部分的比与它们同倍量的比相同，[V. 15]

所以：A比B如同E比F。

又因：A比B如同C比D，

所以：C比D如同E比F。[V. 11]

因为：G、H是C、D的同倍量，

所以：C比D如同G比H。[V. 15]

因为：C比D如同E比F，

所以：E比F如同G比H。[V. 11]

假如四个量成比例，并且第一量大于第三量，那么第二量大于第四量。

假如前二者相等，那么后二者也相等；

假如第一量小于第三量，那么第二量小于第四量。[V. 14]

所以：假如E大于G，那么F大于H。

假如前二者相等，那么后二者也相等；

假如E小于G，那么F小于H。

所以：E、F是A、B的同倍量，并且G、H是另外任意取定的C、D的同倍量。

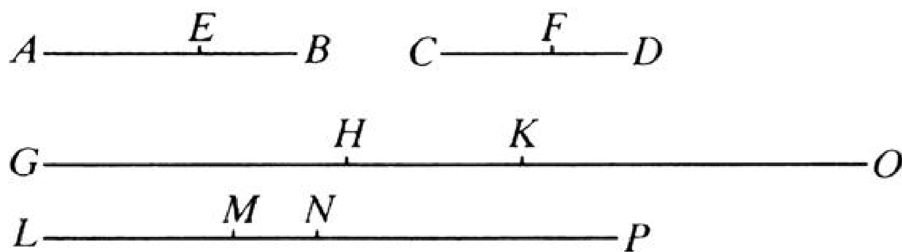
因此：A比C如同B比D。[V. 定义5]

证完。

命题17

…

假如几个量成合比例，那么它们的分比例也成立。



设：AB、BE、CD、DF成合比例。

也就是，AB比BE如同CD比DF。

那么可以说：它们的分比例成立，也就是AE比EB如同CF比DF。

设：AE、EB、CF、FD的同倍量各是GH、HK、LM、MN，

并另外任意取定EB、FD的同倍量KO、NP。

因为：GH是AE的倍量，HK是EB的倍量，它们的倍数相同，

所以：GH是AE的倍量，GK是AB的倍量，它们的倍数相同。[V. 1]

又因：GH是AE的倍量，LM是CF的倍量，它们的倍数相同，

所以：GK是AB的倍量，LM是CF的倍量，它们的倍数相同。

又因：LM是CF的倍量，MN是FD的倍量，它们的倍数相同，

所以：LM是CF的倍量，LN是CD的倍量，它们的倍数相同。[V. 1]

又因：LM是CF的倍量，GK是AB的倍量，它们的倍数相同，

所以：GK是AB的倍量，LN是CG的倍量，它们的倍数相同。

因此：GK、LN是AB、CD的等倍量。

因为：HK是EB的倍量，MN是FD的倍量，它们的倍数相同，

且KO也是EB的倍量，NP是FD的倍量，它们的倍数相同，

所以：和HO也是EB的倍量，MP是FD的倍量，它们的倍数相同。[V. 2]

因为：AB比BE如同CD比DF，

且已取定AB、CD的同倍量GK、LN，

且EB、FD的同倍量为HO、MP，

所以：假如GK大于HO，那么LN大于MP。

如果前二者相等，那么后二者也相等，

假如GK小于HO，那么LN小于MP。

令GK大于HO。

假如由以上每一个减去HK，那么GH大于KO。

如果GK大于HO，那么LN大于MP，

因此LN大于MP，

假如它们每一个减去MN，那么LM大于NP；

所以：假如GH大于KO，那么LM大于NP。

同理可证：假如GH等于KO，那么LM等于NP；

假如GH小于KO，那么LM小于NP，

因为：GH、LM是AE、CF的同倍量，

此时：KO、NP是另外任意取定的EB、FD的同倍量，

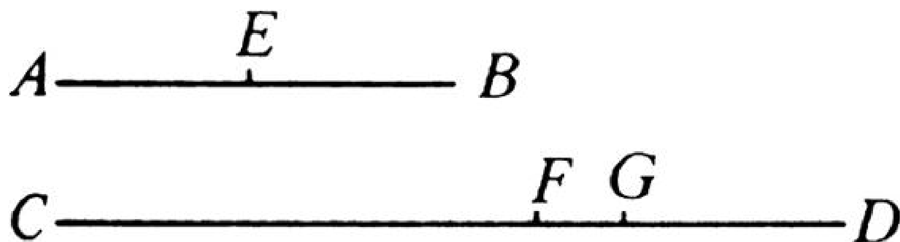
所以：AE比EB如同CF比FD。

证完。

命题18

…

假如几个量成分比例，那么它们的合比例也成立。



设：AE、EB、CF、FD是成比例的量。

也就是AE比EB如同CF比FD。

那么可以说：它们的合比例成立。

也就是AB比BE如同CD比FD。

因为：假如CD比DF不相同于AB比BE，

所以：AB比BE如同于CD比要么小于DF的量，要么大于DF的量。

设：在那个比中的量DG小于DF。

因为：AB比BE如同CD比DG，

它们是成合比例的量，

如此，它们也成分比例。[V. 17]

所以：AE比EB如同CG比GD。

又因，根据假设：AE比EB如同CF比FD，

所以：CG比GD如同CF比FD。[V. 11]

因为：第一量CG大于第三量CF，

所以：第二量GD大于第四量FD。[V. 14]

但是，它同时小于它，这是不符合常理的，

因此：AB比BE不同于CD比一个较FD小的量。

同理可证：CD也不会是一个较FD大的量，

所以：在那个比例中应是FD自身。

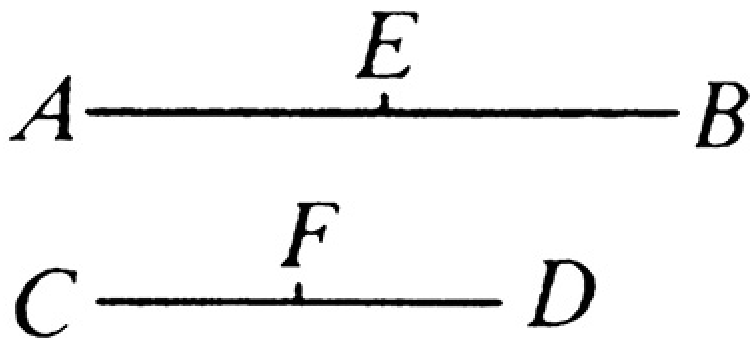
证完。

命题19

…

假如整体比整体如同减去的部分比减去的部分，那么剩余部分比剩余部

分如同整体比整体。



设：整体AB比整体CD如同减去部分AE比减去部分CF。

那么可以说：剩余的EB比剩余的FD如同整体AB比整体CD。

因为：AB比CD如同AE比CF，

它们的更比例为，BA比AE如同DC比CF，[V. 16]

又因：这些量成合比例，它们也成分比例，[V. 17]

也就是：BE比EA如同DF比CF。

又更比例为：BE比DF如同EA比FC。[V. 16]

又因，根据假设：AE比CF如同整体AB比整体CD，

所以：剩余的EB比剩余的FD如同整体AB比整体CD。[V. 11]

证完。

推论　由此，明显可得，假如这些量成合比例，那么它们也成合比例。

命题20

…

如有三个量，又有个数与它们相同的三个量，在各组中每取两个相应的量都有相同的比，假如首末项第一量大于第三量，那么第四量大于第六量；假如前二者相等，那么后二者也相等；假如第一量小于第三量，那么第四量小于第六量。

A ——————— D ———————

B ——— E ———

C ————— F —————

设：有三个量A、B、C；又有另外的量D、E、F。

在各组中每取两个都有相同的比。

假如：A比B如同D比E，且B比C如同E比F；

又设：A大于C，这是首末两项。

那么可以说：D大于F；

如果A等于C，那么D等于F；如果A小于C，那么D小于F。

设：A大于C，并且B是另外的量。

因为：较大者与较小者和同一量相比，大者有较大的比，[V. 8]

所以：A比B大于C比B。

又因：A比B如同D比E，并且由逆比例，C比B如同F比E，

所以：D比E大于F比E。[V. 13]

因为：一些量与同量相比，比大，则原来的量大，[V. 10]

所以：D大于F。

同理可证：假如A等于C，那么D等于F，

假如F小于C，那么D小于F。

证完。

命题21

…

假如有三个量，又有个数与它们相同的三个量，在各组中每取相应的两个量都有相同的比，并且它们成波动比例。

那么，假如首末项中第一量大于第三量，那么第四量大于第六量；假如前二者相等，那么后二者也相等；假如第一量小于第三量，那么第四量小于第六量。

设：有三个量A、B、C；又有另外三个量D、E、F。

各取两个相应量都有相同的比，并且它们成波动比例；

也就是：A比B如同E比F。

又因：B比C如同D比E，

且设：首末两项A大于C。

那么可以说：D大于F；若A等于C，那么D等于F；若A小于C，那么D小于F。

因为：A大于C，并且B是另外的量，

所以：A比B大于C比B。[V. 8]

因为：A比B如同E比F，又由逆比例，C比B如同E比D，

所以：E比F大于E比D。[V. 13]

因为：同一量与一些量相比，其比较大者，则这个量小，[V. 10]

所以：F小于D，

因此：D大于F。

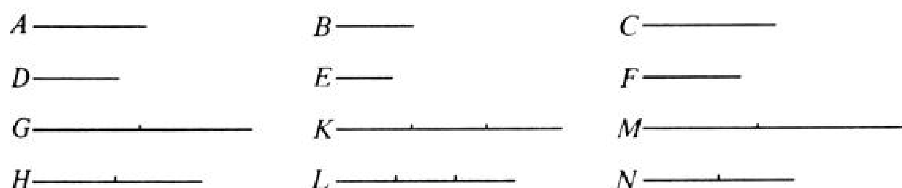
同理可证：假如A等于C，D等于F；假如A小于C，D小于F。

证完。

命题22

…

假如有任意多个量，又有个数与它们相同的一些量，各组中每取两个相应的量都有相同的比，那么它们成首末比例。



设：有任意多个量A、B、C；

又另有与它们个数相同的量D、E、F。

各组中每取两个相应的量都有相同的比，

使A比B如同D比E；

而B比C如同E比F。

那么可以说：它们也成首末比例，也就是A比C如同D比F。

取定A、D的同倍量G、H。

对B、E任意取定它们的同倍量K、L；

对C、F任意取定它们的同倍量M、N。

因为：A比B如同D比E，

且已经取定了A、D的同倍量G、H，另外任意给出B、E的同倍量K、L，

因此：G比K如同H比L。[V. 4]

同理可证：K比M如同L比N。

因为：此时有三个量G、K、M，

并且另外有与它们个数相等的量H、L、N，

且各组每取两个相应的量都有相同的比，

所以：取首末比，如果G大于M，那么H大于N。

假如G等于M，那么H等于N，[V. 20]

假如G小于M，那么H小于N。

因为：G、H是A、D的同倍量，另外任意给出C、F的同倍量M、N，

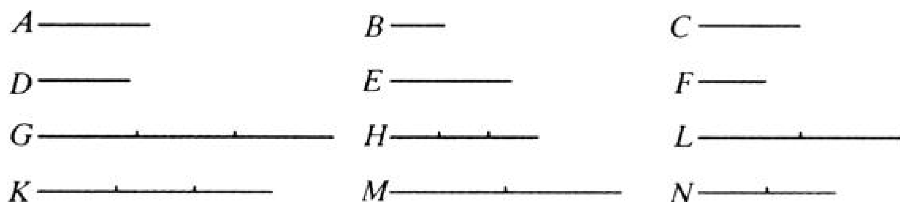
所以：A比C如同D比F。[V. 定义5]

证完。

命题23

…

假如有三个量，又有与它们个数相同的三个量，在各组中每取两个相应的量都有相同的比，它们组成波动比例，那么它们也成首末比例。



设：有三个量*A*、*B*、*C*，并且另外有与它们个数相同的三个量*D*、*E*、*F*。

从各组中每取两个相应的量都有相同的比；

又设：它们组成波动比例，

也就是*A*比*B*如同*E*比*F*，并且*B*比*C*如同*D*比*E*。

那么可以说：*A*比*C*如同*D*比*F*。

取定*A*、*B*、*D*的同倍量*G*、*H*、*K*。

另外任意给出*C*、*E*、*F*的同倍量*L*、*M*、*N*。

因为：*G*、*H*是*A*、*B*的同倍量，部分对部分的比如同它们同倍量的比，[V. 15]

所以：*A*比*B*如同*G*比*H*。

同理可证：*E*比*F*如同*M*比*N*。

并且*A*比*B*如同*E*比*F*，

那么：*G*比*H*如同*M*比*N*。[V. 11]

因为：*B*比*C*如同*D*比*E*，

那么更比例为，*B*比*D*如同*C*比*E*。[V. 16]

又因：H、K是B、D的同倍量，且部分与部分的比如同它们同倍量的比，

所以：B比D如同H比K。[V. 15]

因为：B比D如同C比E，

所以：H比K如同C比E。[V. 11]

因为：L、M是C、E的同倍量，

所以：C比E如同L比M。[V. 15]

又因：C比E如同H比K，

因此：H比K如同L比M，[V. 11]

且更比例为：H比L如同K比M。[V. 16]

由于：已经证明了，G比H如同M比N，

又因：有三个量G、H、L，另外有与它们个数相同的量K、M、N，

各组每取两个量都有相同的比，

并且使它们的这个比例是波动比例，

因此：是首末比，假如G大于L，那么K大于N。

假如G等于L，那么K等于N；

假如G小于L，那么K小于N。[V. 21]

因为：G、K是A、D的同倍量，

并且L、N是C、F的同倍量，

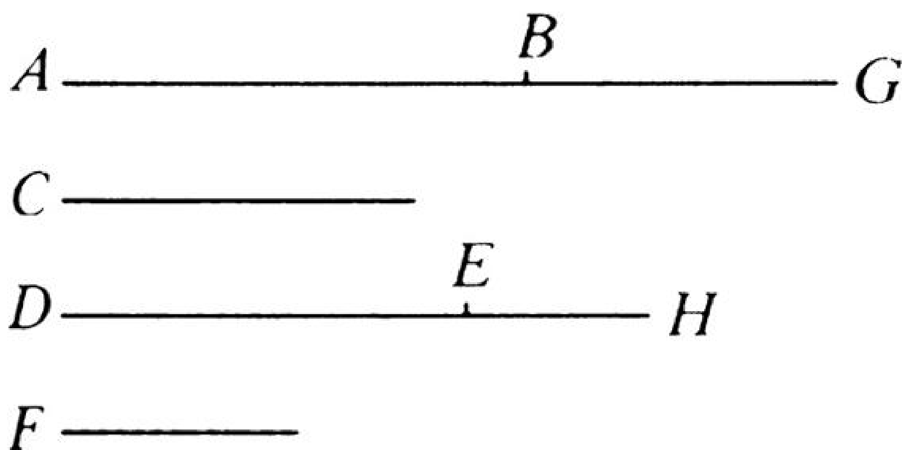
所以：A比C如同D比F。

证完。

命题24

…

假如第一量比第二量与第三量比第四量有相同的比，并且第五量比第二量与第六量比第四量有相同的比，那么第一量与第五量的和比第二量，第三量与第六量的和比第四量有相同的比。



设：第一量AB比第二量C与第三量DE比第四量F有相同的比；

并且第五量BG比第二量C与第六量EH比第四量F有相同的比。

那么可以说：第一量与第五量的和AG比第二量C，与第三量与第六量和DH比第四量F有相同的比。

因为：BC比C如同EH比F，

其反比例为：C比BG如同F比EH。

且AB比C如同DE比F，

又因：C比BG如同F比EH，

所以：首末比为，AB比BG如同DE比EH。[V. 22]

因为：这些量成比例，

所以：它们也成合比例，[V. 18]

因此：*AG*比*GB*如同*DH*比*HE*。

因为：*BG*比*C*如同*EH*比*F*，

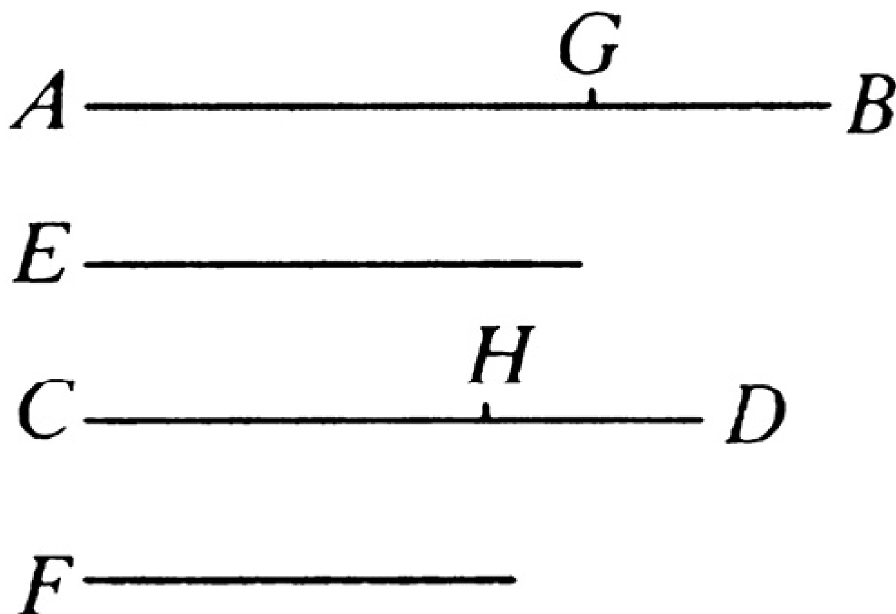
所以：首末比为，*AG*比*C*如同*DH*比*F*。[V. 22]

证完。

命题25

…

假如四个量成比例，那么最大量与最小量的和大于其余两个量的和。



设：四个量*AB*、*CD*、*E*、*F*成比例，

令*AB*比*CD*如同*E*比*F*，其中*AB*是它们中最大的，*F*是最小的。

那么可以说：*AB*与*F*的和大于*CD*与*E*的和。

取AG等于E，并且GH等于F。

因为：AB比CD如同E比F，并且E等于AG，F等于CH，

所以：AB比CD如同AG比CH。

因为：整体AB比整体CD如同减去的部分AG比减去的部分CH，

那么：剩余的GB比剩余的HD也如同整体AB比整体CD。[V. 19]

又因：AB大于CD，

所以：GB大于HD。

因为：AG等于E，并且CH等于F，

所以：AG、F的和等于CH、E的和。

由于，已经证明：GB与HD不等，并且GB较大，

假如：将AG、F加在GB上，并且将CH、E加在HD上，

由此可得：AB与F的和大于CD与E的和。

证完。

卷VI

定义

01 凡直线形，若它们的角对应相等且夹等角的边成比例，则称它们是相似直线形。

02 在两个直线形中，夹角的两边有如下的比例关系，第一形的一边比第二形的一边如同第二形的另一边比第一形的另一边，则称这两个直线形为互逆相似图形。

03　分一线段为二线段，当整体线段比大线段如同大线段比小线段时，则称此线段被分为中外比。

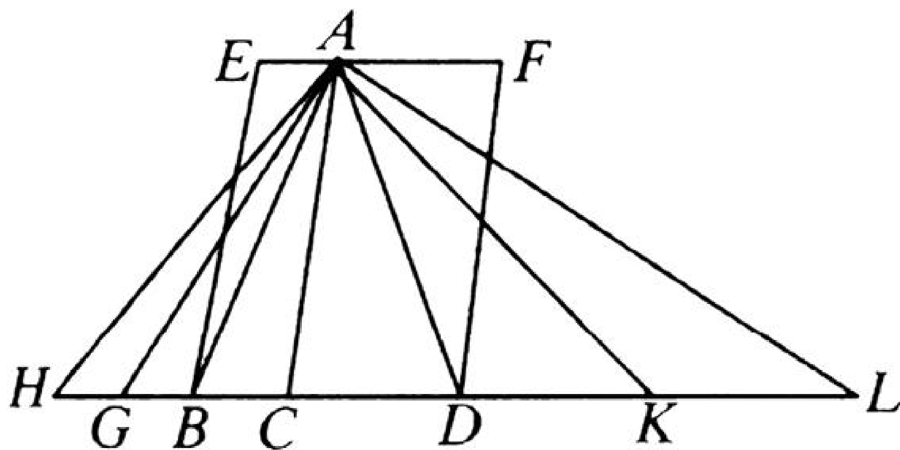
04 在一个图形中，由顶点到底边的垂线叫作图形的高。

命题

命题1

…

等高的三角形或平行四边形，它们彼此之比如同其底之比。



设：两个等高三角形为*ABC*、*ACD*，两个等高平行四边形为*EC*、*CF*。

那么可以说：底*BC*比底*CD*如同三角形*ABC*比三角形*ACD*，也如同平行四边形*EC*比平行四边形*CF*。

向两边延长*BD*至*H*、*L*。

设：任意条线段*BG*、*GH*等于底*BC*。

同时，任意条线段*DK*、*KL*等于底*CD*。

连接*AG*、*AH*、*AK*、*AL*。

由于：*CB*、*BG*、*GH*彼此相等，

三角形*ABC*、*AGB*、*AHG*也彼此相等，[I. 38]

因此：无论底HC是底BC的几倍，三角形AHC也是三角形ABC的同样几倍。

同理可证：无论底LC是底CD的几倍，三角形ALC也是三角形ACD的同样几倍；

若底HC等于底CL，三角形AHC等于三角形ACL；[I. 38]

若底HC大于底CL，三角形AHC大于三角形ACL；

若底HC小于底CL，三角形AHC小于三角形ACL，

因此：有四个量，两个底BC、CD和两个三角形ABC、ACD，已取定底BC和三角形ABC的同倍量，也就是底HC和三角形AHC。

同时，对底CD及三角形ADC取定任意的同倍量，

也就是底LC和三角形ALC。

因为，已经证明：

若底HC大于底CL，三角形AHC大于三角形ALC；

若底HC等于底CL，三角形AHC等于三角形ALC；

若底小于底CL，三角形AHC小于三角形ALC，

所以：底BC比底CD如同三角形ABC比三角形ACD。[V. 定义5]

又因：平行四边形EC是三角形ABC的二倍，[V. 41]

平行四边形FC是三角形ACD的二倍，

部分比部分如同它们的同倍量比同倍量，[V. 15]

所以：三角形ABC比三角形ACD如同平行四边形EC比平行四边形FC。

因为：已证底BC比CD如同三角形ABC比三角形ACD，

又因：三角形*ABC*比三角形*ACD*如同平行四边形*EC*比平行四边形*FC*，

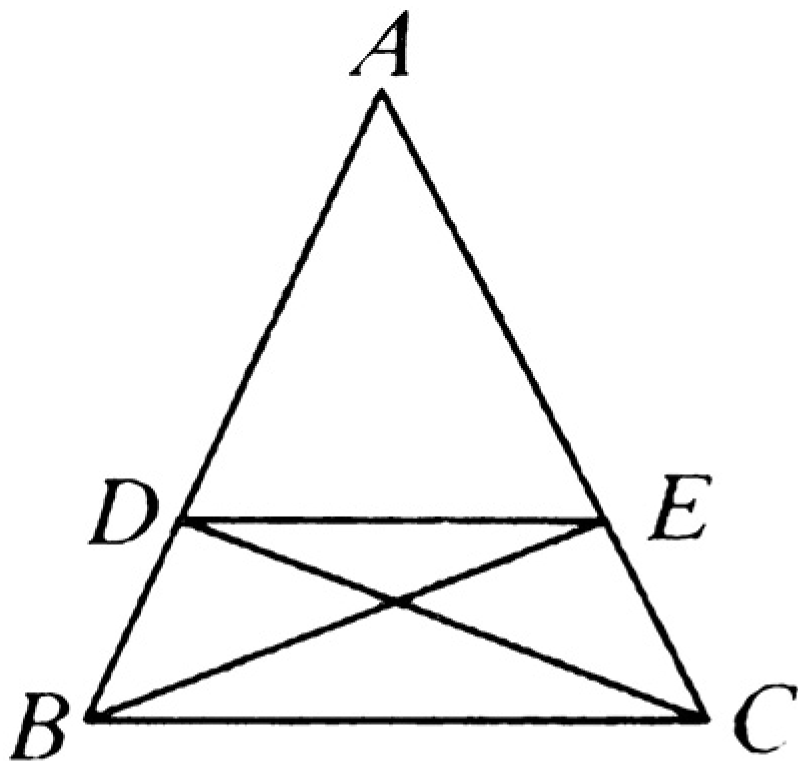
所以：底*BC*比底*CD*也如同平行四边形*EC*比平行四边形*FC*。[V. 11]

证完。

命题2

…

若一条直线平行于三角形的一边，那么它截三角形的两边成比例线段；并且，若三角形的两边被截成比例线段，那么截点的连线平行于三角形的另一边。



假如：作*DE*平行于三角形的一边*BC*。

那么可以说：*BD*比*DA*如同*CE*比*EA*。

连接*BE*、*CD*。

那么三角形*BDE*等于三角形*CDE*；

因为：它们有同底*DE*，并且在平行线*DE*、*BC*之间，[I. 38]

且三角形*ADE*是另外一个面片，

又因：相等的量比同一量，其比相同，[V. 7]

所以：三角形*BDE*比三角形*ADE*如同三角形*CDE*比三角形*ADE*。

因为：三角形*BDE*比*ADE*如同*BD*比*DA*，

又因：高相同，也就是由*E*到*AB*的垂线，它们彼此相比如同它们的底的比。[VI. 1]

同理，三角形*CDE*比*ADE*如同*CE*比*EA*，

所以：*BD*比*DA*如同*CE*比*EA*。[V. 11]

设：三角形*ABC*的边*AB*、*AC*被截成比例线段，由此，*BD*比*DA*如同*CE*比*EA*，连接*DE*。

那么可以说：*DE*平行于*BC*。

可用同样的方法来作图：

*BD*比*DA*如同*CE*比*EA*，

但*BD*比*DA*如同三角形*BDE*比三角形*ADE*。

又因：*CE*比*EA*如同三角形*CDE*比三角形*ADE*，[VI. 1]

所以：三角形*BDE*比三角形*ADE*，又如同三角形*CDE*比三角形*ADE*，[V. 11]

所以：三角形*BDE*、*CDE*的每一个比*ADE*有相同的比，

所以：三角形*BDE*等于三角形*CDE*，[V. 9]

并且，它们在同底DE上。

又因：在同底上相等的三角形，它们也在同平行线之间，

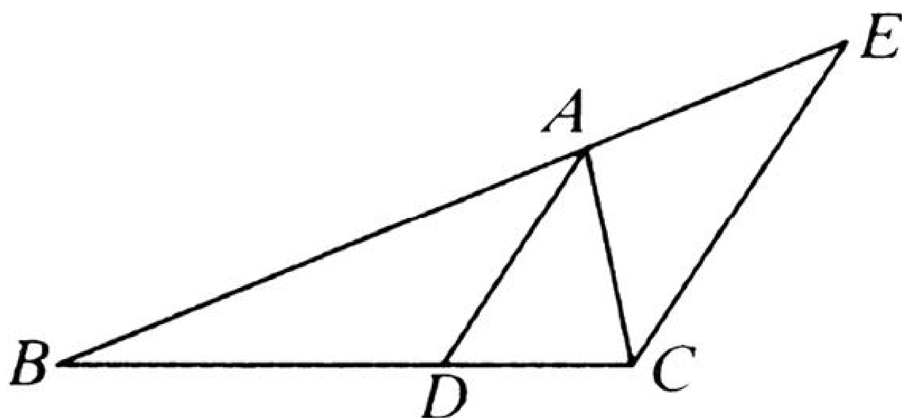
故：DE平行于BC。[I. 39]

证完。

命题3

…

若二等分三角形的一个角，它的分角线也将底截成两线段，那么这两条线段的比如同三角形其他两边之比；若分底成两线段的比如同三角形其他两边的比，那么由顶点到分点的连线平分三角形的顶角。



设：有一三角形ABC，AD二等分角BAC。

那么可以说：BD比CD如同BA比AC。

经过C作CE平行于DA，并且延长AB和它交于E。

因为：AC和平行线AD、EC相交，角ACE等于角CAD，[I. 29]

又因：已假设，角CAD等于角BAD，

因此：角BAD等于角ACE。

由于：直线BAE和平行线AD、EC相交，

外角BAD等于内角AEC，[I. 29]

又因：已经证明角ACE等于角BAD，

因此：角ACE等于角AEC，

所以：边AE等于边AC。[I. 6]

因为：作了AD平行于三角形BCE的一边EC，

所以：有比例，BD比DC如同BA比AE。[VI. 2]

又因：AE等于AC，

所以：BD比DC等于BA比AC。

又设：BA比AC如同BD比DC，连接AD，

那么可以说：直线AD二等分角BAC。

同样作图。

因为：BD比DC如同BA比AC，

又因：已经作了AD平行于三角形BCE的一边EC，

因此：BD比DC如同BA比AE，[VI. 2]

因此：BA比AC如同BA比AE，[V. 11]

且AC等于AE，[V. 9]

所以：角AEC等于角ACE。[I. 5]

因为：同位角AEC等于角BAD，[I. 29]

又因：内错角ACE等于角CAD，[I. 29]

所以：角*BAD*等于角*CAD*，

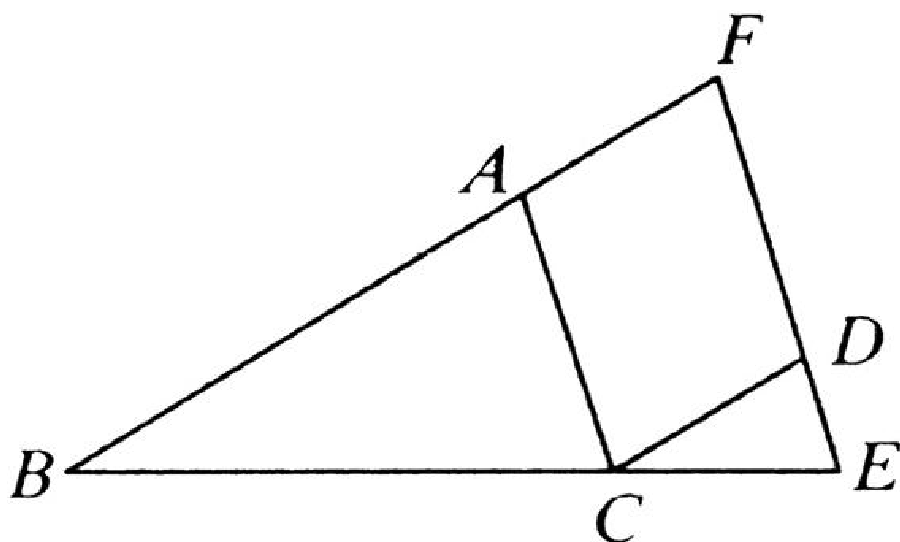
所以：直线*AD*二等分角*BAC*。

证完。

命题4

…

在两个三角形中，假如各角对应相等，那么夹等角的边成比例，其中等角所对的边是对应边。



设：三角形*ABC*、*DCE*的各角对应相等，角*ABC*等于角*DCE*，角*BAC*等于角*CDE*，角*ACB*等于角*CED*。

那么可以说：在三角形*ABC*、*DCE*中，夹等角的边成比例，其中等角所对的边是对应边。

设：将*BC*和*CE*置于一条直线上。

因为：角*ABC*、*ACB*之和小于两直角，[I. 17]

并且角ACB等于角DEC，

因此：角ABC、DEC之和小于两直角，

所以：BA、ED延长后必相交。[I. 公设5]

设：它们的交点是F。

因为：角DCE等于角ABC，

所以：BF平行于CD。[I. 28]

又因：角ACB等于角DEC，

所以：AC平行于FE，[I. 28]

所以：$FACD$是一个平行四边形，

所以：FA等于DC，并且AC等于FD。[I. 34]

又因：AC平行于三角形FBE的边FE，

所以：BA比AF如同BC比CE。[VI. 2]

又因：AF等于CD，

所以：BA比CD如同BC比CE。

由更比：AB比BC如同DC比DE，[V. 16]

且CD平行于BF，

所以：BC比CE如同FD比DE。[VI. 2]

因为：FD等于AC，

所以：BC比CE如同AC比DE，

由更比：BA比CA如同CE比ED。[V. 16]

因已经证明：*AB*比*BC*如同*DC*比*CE*，

并且*BC*比*CA*如同*CE*比*ED*，

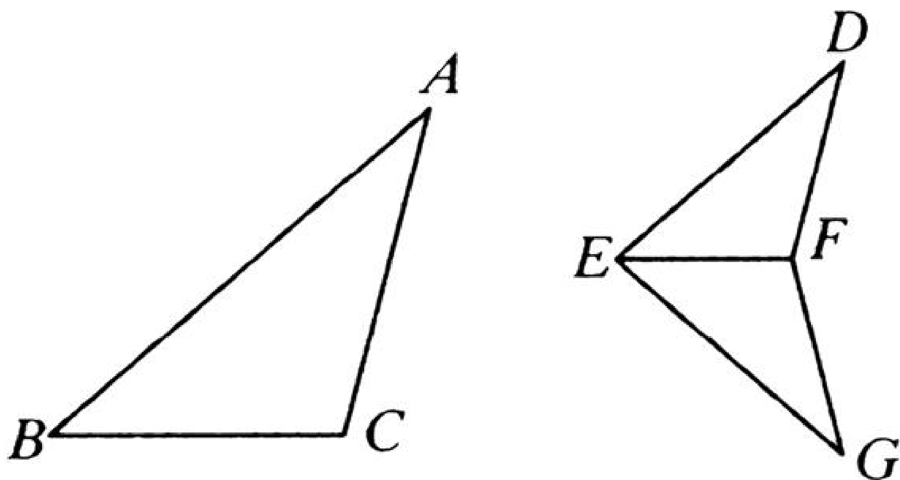
所以：由首末比，*BA*比*AC*如同*CD*比*DE*。[V. 22]

证完。

命题5

…

若两个三角形的边成比例，那么它们的角是相等的，也就是对应边所对的角相等。



设：*ABC*、*DEF*是两个三角形，它们的边成比例。也就是：

*AB*比*BC*如同*DE*比*EF*；

*BC*比*CA*如同*EF*比*FD*；

*BA*比*AC*如同*ED*比*DF*，

那么可以说：三角形*ABC*与三角形*DEF*的角是对应相等的。

这些角是对应边所对的角，也就是角ABC等于角DEF，角BCA等于角EFD，角BAC等于角EDF。

由于：在线段EF上的点E、F处作角FEG等于角ABC，并且角EFG等于角ACB，[I. 23]

因此：剩下的在点A的角等于剩下的在点G的角，[I. 32]

所以：三角形ABC和三角形GEF是等角的，

所以：在三角形ABC、GEF中，夹等角的边成比例，并且那些对着等角的边是对应边，[VI. 4]

因此：AB比BC如同GE比EF。

根据假设：AB比BC如同DE比EF，

因此：DE比EF如同GE比EF，[V. 11]

所以：线段DE、GE的每一条与EF相比有相同的比，

因此：DE等于GE。[V. 9]

同理可证：DF等于GF。

由于：DE等于EG，且EF是公共的，

两边DE、EF等于两边GE、EF，底DF等于底FG，

所以：角DEF等于角GEF，[I. 8]

并且，三角形DEF全等于三角形GEF，

又因：其余的角等于其余的角，也就是等边所对的角，[I. 4]

因此：角DFE等于角GFE，角EDF等于角GEF，

因为：角FED等于角GEF，角GEF等于角ABC，

所以：角ABC等于角DEF。

同理可得：角*ACB*等于角*DFE*，

且，在点*A*的角等于在点*D*的角，

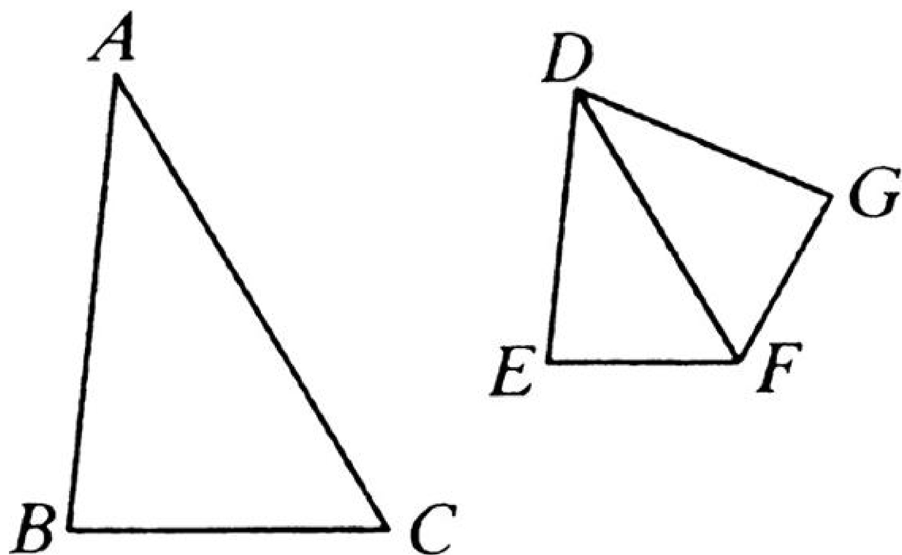
所以：三角形*ABC*与三角形*DEF*是等角的。

证完。

命题6

…

若在两个三角形中，各自有一个角对应相等，并且夹这两角的边成比例，那么这两个三角形是等角的，并且这些等角是对应边所对的角。



设：三角形*ABC*、*DEF*中，角*BAC*等于角*EDF*，并且夹这两个角的边成比例，

也就是*BA*比*AC*如同*ED*比*DF*。

那么可以说：三角形*ABC*与三角形*DEF*的各角是相等的。

也就是，角*ABC*等于角*DEF*，角*ACB*等于角*DFE*。

由于：在直线*DF*上的点*D*、*F*处作角*FDG*等于角*BAC*，或是等于角*EDF*，又有角*DFG*等于角*ACB*，[I. 23]

所以：其余在*B*处的角等于在点*G*处的角，[I. 32]

所以：三角形*ABC*与三角形*DGF*的各角是相等的，[VI. 4]

所以：成比例，*BA*比*AC*如同*GD*比*DF*。

根据假设：*BA*比*AC*如同*ED*比*DF*，

故：*ED*比*DF*如同*GD*比*DF*，[I. 11]

因此：*ED*等于*DG*。[V. 9]

又因：*DF*是公共的，

所以：两边*ED*、*DF*等于两边*GD*、*DF*；并且角*EDF*等于角*GDF*，

所以：底*EF*等于底*GF*，

因为：三角形*DEF*全等于三角形*DGF*，其余的角等于其余的角，

也就是等边所对的角，[I. 4]

所以：角*DFG*等于角*DFE*，并且角*DGF*等于角*DEF*。

又因：角*DFG*等于角*ACB*，

因此：角*ACB*等于角*DFE*。

根据假设：角*BAC*等于角*EDF*，

所以：其余在*B*的角等于在*E*的角，[I. 32]

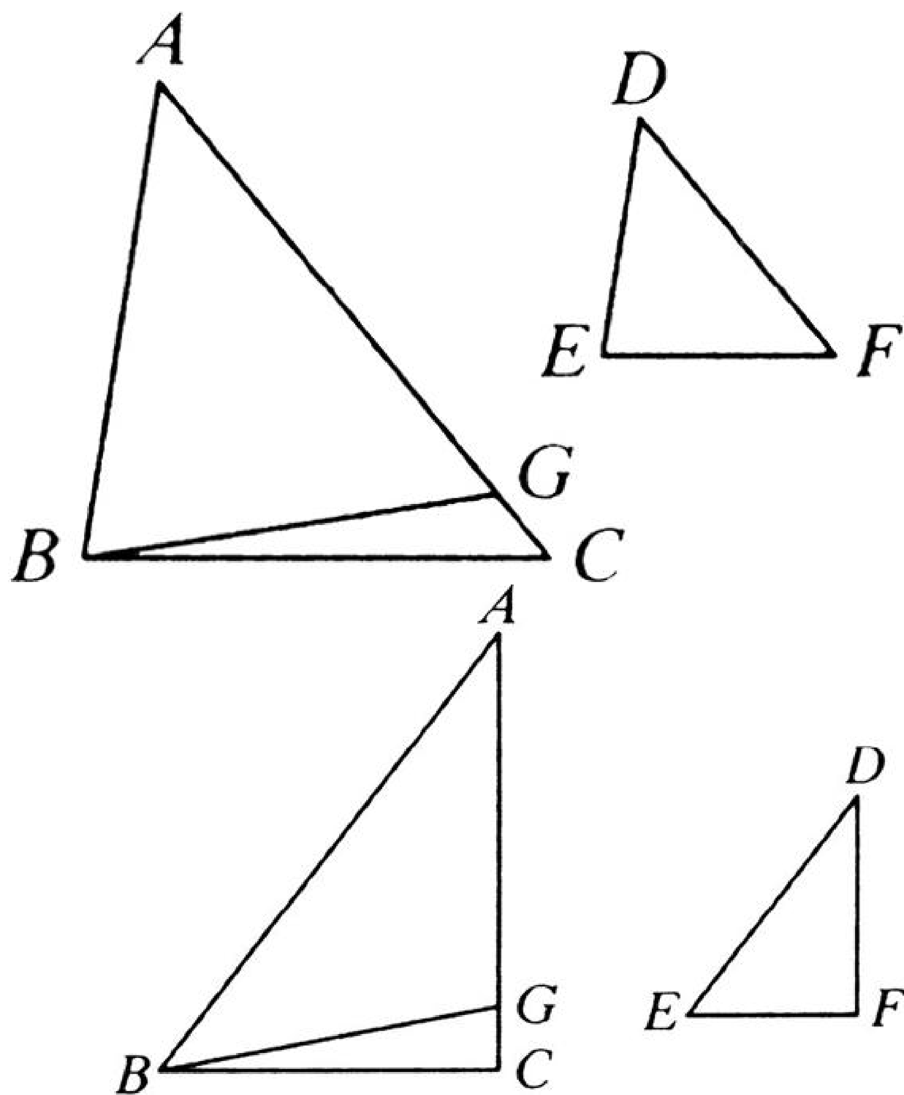
因此：三角形*ABC*与三角形*DEF*的各角是相等的。

证完。

命题7

…

若在两个三角形中，各自有一个角对应相等，夹另外两个角的边成比例，其余的两个角要么都小于直角，要么都不小于直角，那么这两个三角形的各角相等，也就是成比例的边所夹的角也相等。



设：*ABC*、*DEF*是各有一个角相等的两个三角形，角*BAC*等于角

EDF，夹另外角*ABC*、*DEF*的边成比例，也就是*AB*比*BC*如同*DE*比*EF*。

先假设，在*C*、*F*处的角都小于一个直角。

那么可以说：三角形*ABC*与三角形*DEF*的各角相等，角*ABC*等于角*DEF*。

余下的角也相等，也就是在*C*处的角等于在*F*处的角。

又设：角*ABC*不等于角*DEF*，它们中有一个较大，

设较大的角是*ABC*，

在线段*AB*上的点*B*处作角*ABG*等于角*DEF*。[I. 23]

又因：角*A*等于角*D*，角*ABG*等于角*DEF*，

因此：余下的角*AGB*等于角*DFE*，[I. 32]

所以：三角形*ABG*与三角形*DEF*的各角是相等的，

所以：*AB*比*BG*如同*DE*比*EF*。[VI. 4]

根据假设：*DE*比*EF*如同*AB*比*BC*，

因此：*AB*比线段*BC*、*BG*的每一个有相同的比，[V. 11]

所以：*BC*等于*BG*，[V. 9]

所以：在*C*处的角等于角*BGC*。[I. 5]

但根据假设：在*C*处的角小于一个直角，

所以：角*BGC*小于一直角，

因此：它的邻角*AGB*大于一直角。[I. 13]

因为：已证明它等于在*F*处的角，

因此：在*F*处的角大于一直角。

根据假设，它小于一直角，这是互相矛盾的，

因此：角*ABC*必须等于角*DEF*，

但在*A*处的角等于在*D*处的角，

所以：其余在*C*处的角等于在*F*处的角，[I. 32]

因此：三角形*ABC*与三角形*DEF*的各角相等。

又设：在*C*、*F*处的角，每一个不小于一直角，

那么可以说：在这种情况下，三角形*ABC*仍与三角形*DEF*的各角相等。

用相同作图，可以证明：

*BC*等于*BG*，

所以：在*C*处的角等于角*BGC*。[I. 5]

又因：在*C*处的角不小于一直角，

所以：角*BGC*绝不会小于一直角，

故：在三角形*BGC*中，有两个角的和不小于两直角，这是不符合实际的，[I. 17]

因此：角*ABC*等于角*DEF*。

又因：在*A*处的角等于在*D*处的角，

因此：其余在*C*处的角等于在*F*处的角，[I. 32]

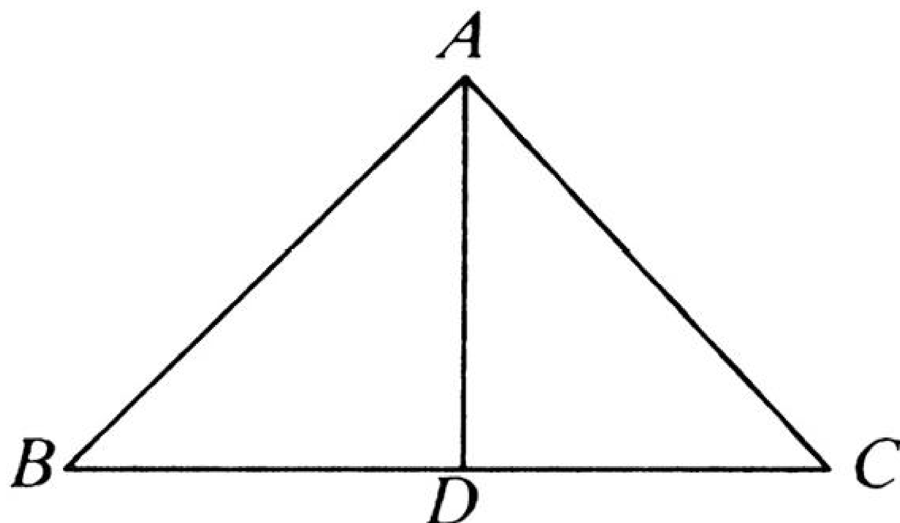
所以：三角形*ABC*与三角形*DEF*的各角是相等的。

证完。

命题8

…

假如在直角三角形中，由直角顶点向底作垂线，那么与垂线相邻的两个三角形都与原三角形相似，并且它们彼此相似。



设：*ABC*是一个直角三角形，其直角为*BAC*，从*A*向*BC*所作的垂线为*AD*。

那么可以说：*ABD*、*ADC*的每个都和原三角形*ABC*相似，并且它们也彼此相似。

因为：角*BAC*与角*ADB*都是直角且彼此相等，

又因：在*B*的角是两三角形*ABC*和*ABD*的公共角，

所以：其余的角*ACB*等于其余的角*BAD*，[I. 32]

所以：三角形*ABC*和三角形*ABD*的各角相等，

因此：在三角形*ABC*中对直角的边*BC*比三角形*ABD*中对直角的边*BA*，又如同三角形*ABC*中对角*C*的边*AB*比三角形*ABD*中对等角*BAD*的边*BD*，而且也如同*AC*比*AD*；

这是因为，它们是这两个三角形公共点*B*处的角所对的边，

所以：三角形ABC与三角ABD是等角的且夹等角的边成比例，

故：三角形ABC与三角形ABD相似。[VI. 定义I]

同理可得：三角形ABC相似于三角形ADC，

所以：三角形ABD、ADC的每一个都相似于原来三角形ABC。

同时也可证：三角形ABD、ADC也彼此相似。

因为：直角BDA等于直角ADC，

因此：其余在B处的角等于角DAC，[I. 32]

所以：三角形ABD和三角形ADC的各角相等。

所以：在三角形ABD中角BAD所对的边BD比在三角形ADC中的DA，它对着C点处的角等于角BAD，这比如同在三角形ABD中在点B处的角ABC的对边AD比在三角形ADC中在点B处的角DAC所对的边DC，也如同BA比AC，这是因为，这两边对着所在三角形中的直角，[VI. 4]

因此：三角形ABD相似于三角形ADC。[VI. 定义1]

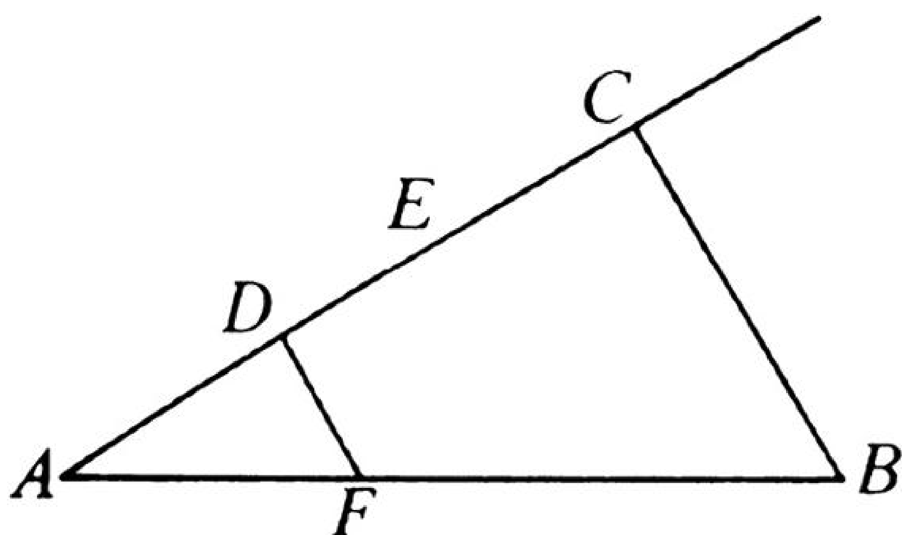
证完。

推论 若在一个直角三角形中，由直角向底作一垂线，那么这条垂线是底上两段的比例中项。

命题9

…

从已知线段上截取一段定长线段。



设：已知线段*AB*。

要求：在*AB*上截取线段等于定长。假设那部分是原长的三分之一。从点*A*作直线*AC*和*AB*成任意角，在*AC*上任取一点*D*，让*DE*、*EC*等于*AD*。[I. 3]

连接*BC*，过*D*作*DF*平行于它。[I. 31]

那么：*FD*平行于三角形*ABC*的一边*BC*，按比例，*CD*比*DA*如同*BF*比*FA*。[VI. 2]

由于：*CD*是*DA*的二倍，

因此：*BF*也是*FA*的二倍，

所以：*BA*是*AF*的三倍，

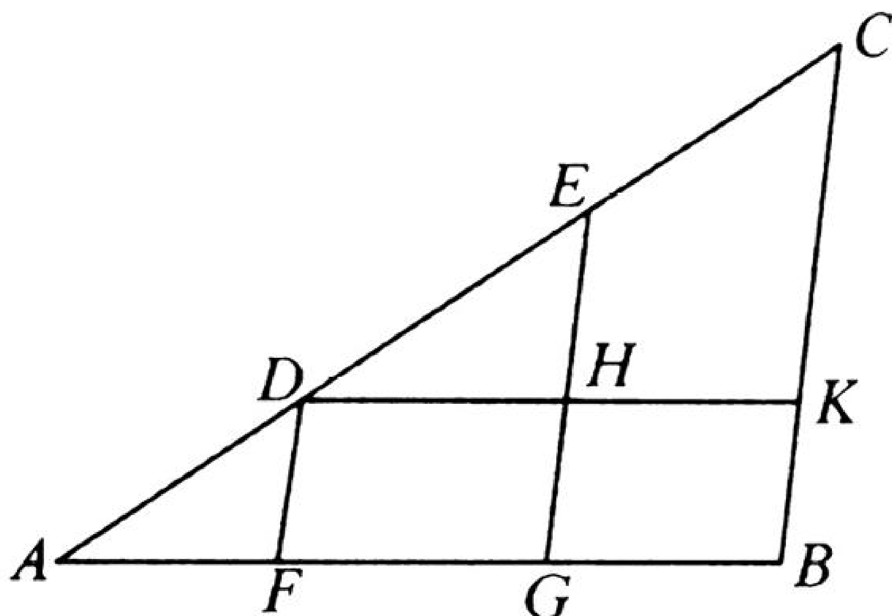
因此：在已知线段*AB*上截出了*AF*等于原长的三分之一。

作完。

命题10

…

分一已知的未分线段使它相似于已分线段。



设：已知未分线段*AB*，已分线段*AC*被截于点*D*、*E*，它们交成任意角，

连接*CB*，过*D*、*E*作*DF*、*EG*平行于*BC*，过*D*作*DHK*平行于*AB*，[I. 31]

因此：图形*FH*、*HB*的每一个都是平行四边形，

所以：*DH*等于*FG*，*HK*等于*GB*。[I. 34]

因为：线段*HE*平行于三角形*DKC*的一边*KC*，

所以：按比例，*CE*比*ED*如同*KH*比*HD*。[VI. 2]

又因：*KH*等于*BG*，*HD*等于*GF*，

所以：*CD*比*ED*如同*BG*比*GF*。

因为：*FD*平行于三角形*AGE*的一边*GE*，

所以：按比例，*ED*比*DA*如同*GF*比*FA*。[VI. 2]

由于已经证明，CE比ED如同BG比GF，

所以：CE比ED如同BG比GF。

又因：ED比DA如同GF比FA，

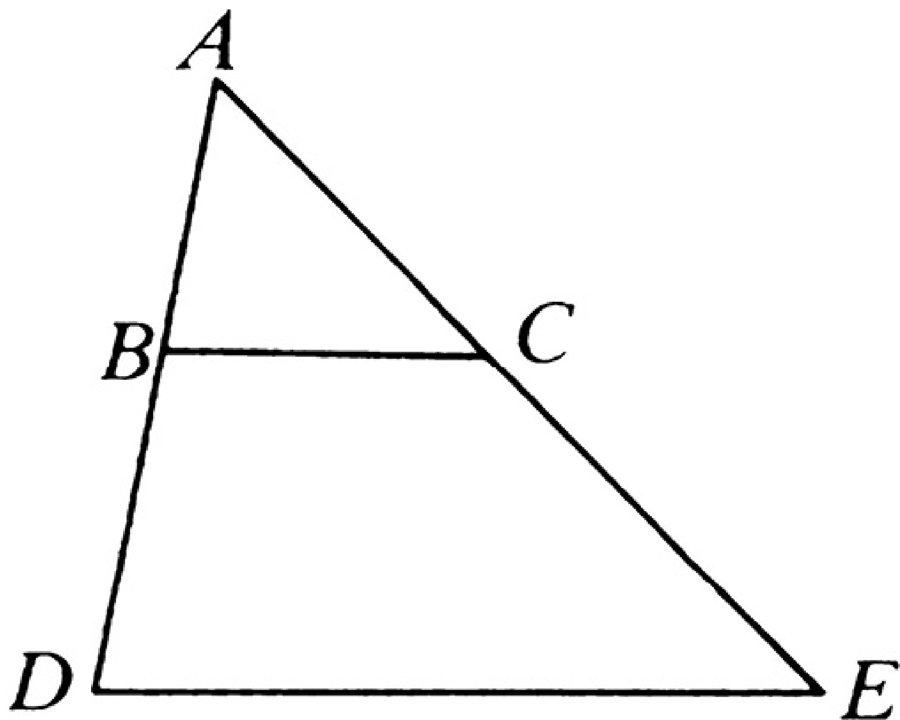
所以：将已知未分线段AB分成与已知已分线段AC相似的线段。

作完。

命题11

…

求作已知二线段的第三比例项。



设：已知线段BA、AC，且设它们交成任意角。

要求：作BA、AC的第三比例项。

延长它们到点D、E，让BD等于AC；[I. 3]

连接BC，经过D作DE平行于BC。[I. 31]

因为：BC平行于三角形ADE的一条边DE，

所以：按比例，AB比BD如同AC比CE。[VI. 2]

又因：BD等于AC，

所以：AB比AC如同AC比CE，

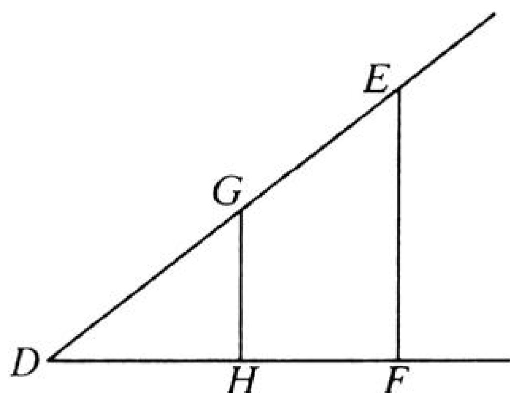
所以：对给定的二线段AB、AC作了它们的第三比例项CE。

作完。

命题12

…

求作已知的三线段的第四比例项。



设：给定线段a、b、c。

要求：作a、b、c的第四比例项。

设：两条直线DE、DF交成任意角EDF，取DG等于a，GE等于b，DH等于c；

连接GH，并且过E作EF平行于它。[I. 31]

因为：GH平行于三角形DEF的一边EF，

所以：DG比GE如同DH比HF。[VI. 2]

又因：DG等于a，GE等于b，并且DH等于c，

所以：a比b如同c比HF，

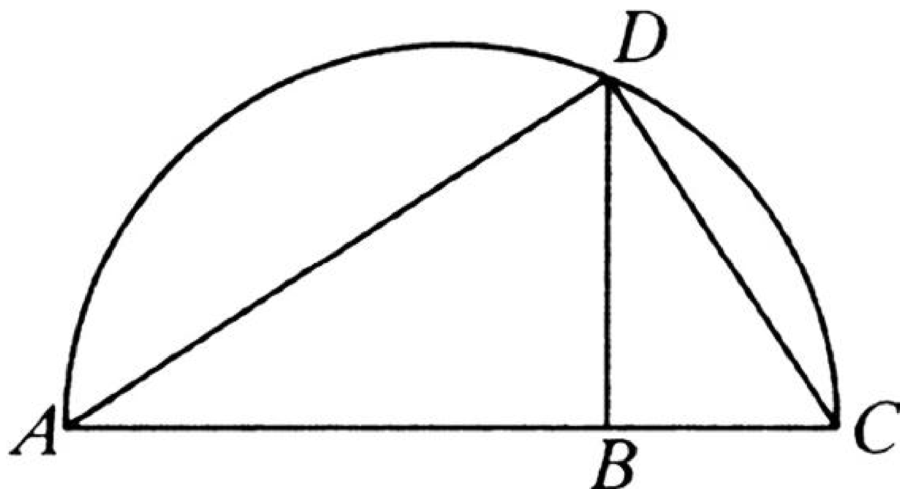
所以：对已知三条线段a、b、c作了第四比例项HF。

作完。

命题13

…

求作两条已知线段的比例中项。



设：已知线段AB、BC。

要求：作AB、BC的比例中项。

设：它们在同一直线上，在AC上作半圆ADC，在点B处作BD和直线

*AC*成直角。

连接*AD*、*DC*。

因为：角*ADC*是半圆上的内接角，

所以：它是直角。[III. 31]

又因：在直角三角形*ADC*中，*DB*是由直角的顶点作到底边的垂线，

所以：*DB*是底*AB*、*BC*的比例中项，[VI. 8，推论]

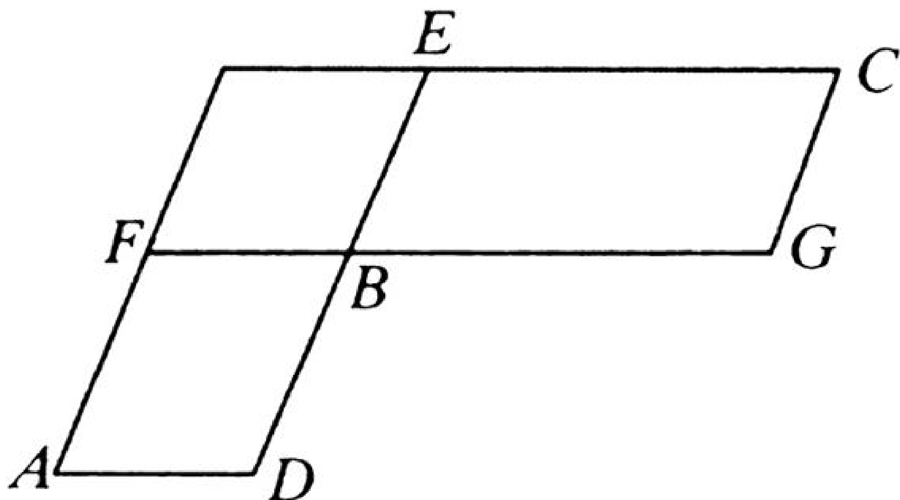
所以：对两条已知线段*AB*、*BC*作了比例中项*DB*。

作完。

命题14

…

在相等且等角的平行四边形中，夹等角的边成互反比例；在等角平行四边形中，若夹等角的边成互反比例，那么它们相等。



设：*AB*、*BC*是相等且等角的平行四边形，并且在*B*处的角相等，*DB*、*BE*在同一直线上。

那么：FB、BG也在一直线上。[I. 14]

那么可以说：AB、BC中夹等角的边成互反比例，即DB比BE如同GB比BF。

将平行四边形FE完全画出，

因为：平行四边形AB等于平行四边形BC、FE是另一面片，

所以：AB比FE如同BC比FE，[V. 7]

又因：AB比FE如同DB比BE，BC比FE如同GB比BF，[VI. 1]

所以：DB比BE如同GB比BF，[V. 11]

因此：在平行四边形AB、BC中夹等角的边成互反比例。

又设：BG比BF如同DB比BE。

那么可以说：平行四边形AB等于平行四边形BC。

因为：DB比BE如同GB比BF，

则DB比BE如同平行四边形AB比平行四边形FE，[VI. 1]

又因：BG比BF如同平行四边形BC比平行四边形FE，[VI. 1]

所以：AB比FE如同BC比FE，[V. 11]

因此：平行四边形AB等于平行四边形BC。[V. 9]

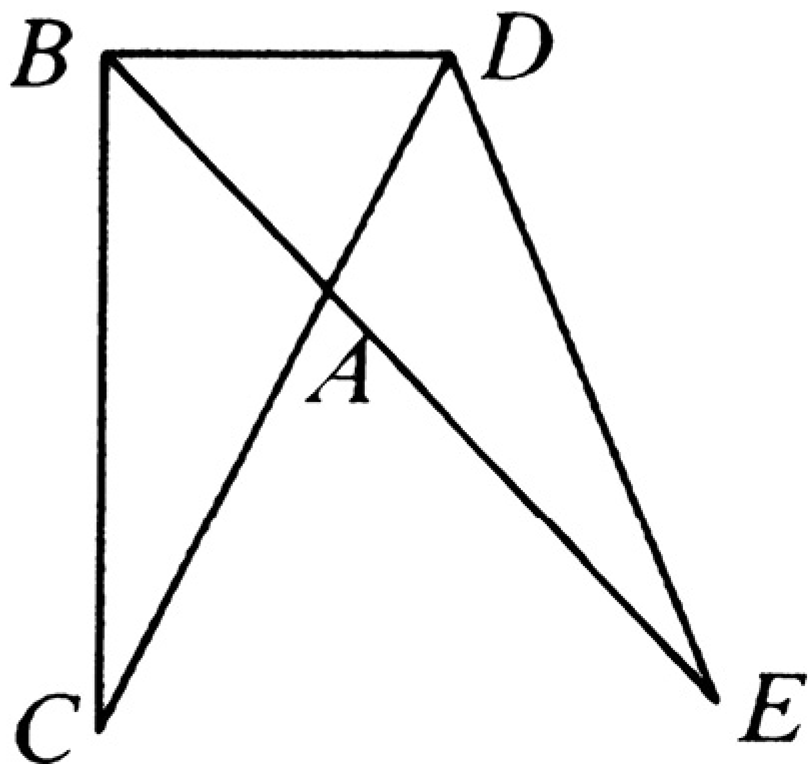
证完。

命题15

…

在相等的两个三角形中，各有一个对角相等，那么，夹等角的边成互反比例；反而言之，两个三角形各有一对角相等，并且夹等角的边成互反

比例，那么，它们就相等。



设：两个相等的三角形*ABC*、*ADE*，并且有一对角相等，也就是角*BAC*等于角*DAE*。

那么可以说：在三角形*ABC*、*ADE*中，夹等角的边成互反比例。

也就是，*CA*比*AD*如同*EA*比*AB*。

因为，可以让*CA*和*AD*在一直线上，因此：*EA*和*AB*也在一条直线上，[I. 14]

连接*BD*，

因为：三角形*ABC*等于三角形*ADE*，而三角形*BAD*是另一个面片，

所以：三角形*CAB*比三角形*BAD*如同三角形*EAD*比三角形*BAD*。[V. 7]

又因：CAB比BAD如同CA比AD，

EAD比BAD如同EA比AB，[VI. 1]

所以：CA比AD如同EA比AB，[V. 11]

故：在三角形ABC、ADE中，夹等角的边成互反比例。

又设：三角形ABC、ADE的边成互反比例，即EA比AB如同CA比AD。

那么可以说：三角形ABC等于三角形ADE。

因为：再连接BD，CA比AD如同EA比AB，

故：CA比AD如同三角形ABC比三角形BAD。

又因：EA比AB如同三角形EAD比三角形BAD，[VI. 1]

所以：三角形ABC比三角形BAD如同三角形EAD比三角形BAD，[V. 11]

因此：三角形ABC、EAD的每一个与三角形BAD有相同的比。

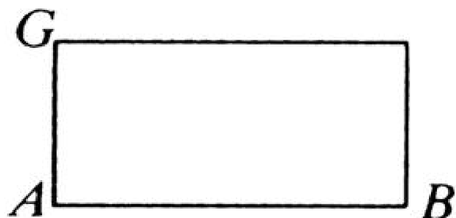
所以：三角形ABC等于三角形EAD。[V. 9]

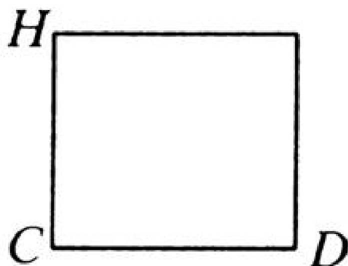
证完。

命题16

…

若四条线段成比例，那么两外项围成的矩形等于两内项围成的矩形；若两外项围成的矩形等于两内项围成的矩形，那么四条线段成比例。





设：四条线段*AB*、*CD*、*e*、*f*成比例，*AB*比*CD*如同*e*比*f*。

那么可以说：*AB*、*f*围成的矩形等于由*CD*、*e*围成的矩形。

设：在点*A*、*C*处作*AG*、*CH*与直线*AB*、*CD*成直角，取*AG*等于*f*，取*CH*等于*e*。

作平行四边形*BG*、*DH*成补形。

因为：*AB*比*CD*如同*e*比*f*，

且*e*等于*CH*，*f*等于*AG*，

因此：*AB*比*CD*如同*CH*比*AG*，

所以：在平行四边形*BG*、*DH*中夹等角的边成互反比例。

因为：在这两个等角平行四边形中，当夹等角的边成互反比例时是相等的，[VI. 14]

所以：平行四边形*BG*等于平行四边形*DH*。

又因：*AG*等于*f*，

故：*BG*是矩形*AB*、*f*。

又因：*e*等于*CH*，

故：*DH*是矩形*CD*、*e*，

所以：由AB、f围成的矩形等于CD、e围成的矩形。

那么可以说：AB比CD如同e比f。

用同样的作图。

因为：矩形AB、f等于矩形CD、e，

又矩形AB、f是BG，这是因为AG等于f，

且矩形CD、e是DH，这是因为CH等于e，

所以：BG等于DH，且它们是等角的。

因为：在相等且等角的平行四边形中，夹等角的边成互反比例，[VI. 14]

所以：AB比CD如同CH比AG。

又因：CH等于e，AG等于f，

所以：AB比CD如同e比f。

证完。

命题17

…

假如三条线段成比例，那么两外项围成的矩形等于中项上的正方形；假如两外项围成的矩形等于中项上的正方形，那么这三条线段成比例。

a

b

c

d

设：三条线a、b、c成比例，也就是a比b如同b比c。

那么可以说：a、c围成的矩形等于b上的正方形。

设：取d等于b。

因为：a比b如同b比c，且b等于d，

所以：a比b如同d比c。

假如四条线段成比例，那么两外项围成的矩形等于两中项围成的矩形，[VI. 16]

所以：矩形a、c等于矩形b、d。

又因：b等于d，矩形b、d是b上的正方形，

所以：a、c围成的矩形等于b上的正方形。

又设：矩形a、c等于b上的正方形。

那么可以说：a比b如同b比c。

用同一图形。

因为：矩形a、c等于b上的正方形，

又因：b等于d，b上的正方形是矩形b、d，

所以：矩形a、c等于矩形b、d。

若两外项围成的矩形等于两中项围成的矩形，那么这四条线段成比例。[VI. 16]

所以：a比b如同d比c。

又因：b等于d，

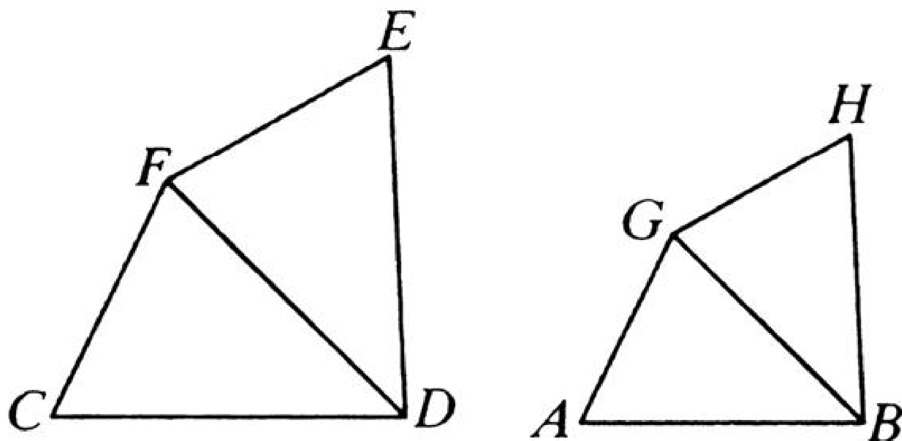
所以：a比b如同b比c。

证完。

命题18

…

在已知线段上作一个直线形使它与某已知直线形相似且有相似位置。



设：已知线段AB，并且已知直线形CE。

要求：在线段AB上作一个与直线形CE相似且有相似位置的直线

形。

连接DF，在线段AB上的点A、B处作角GAB，让它等于点C处的角，角ABG等于角CDF。[I. 23]

那么：余下的角CFD等于角AGB，[I. 32]

所以：三角形FCD与三角形GAB是等角的，

因此：按比例，FD比BG如同FC比GA，又如同CD比AB。

又因：在线段BG上的点B、G处，作角BGH等于角DFE，角GBH等于角FDE，[I. 23]

那么：余下的在E处的角等于在H处的角，[I. 32]

所以：三角形FDE与三角形BGH是各角分别相等的，

因此：有比例，FD比BG如同FE比GH，又如同ED比HB。[VI. 4]

又因，已经证明：FD比GB如同FC比GA，又如同CD比AB，

所以：FC比AG如同CD比AB，又如同FE比GH，又如同ED比HB。

又因：角CFD等于角AGB，角DFE等于角BGH，

所以：整体角CFE等于整体角AGH。

同理可证：角CDE等于角ABH。

在C处的角等于在A处的角，

在E处的角等于在H处的角，

所以：AH与CE是各角分别相等的。

又因：它们夹等角的边成比例，

所以：直线形AH相似于直线形CE，[VI. 定义1]

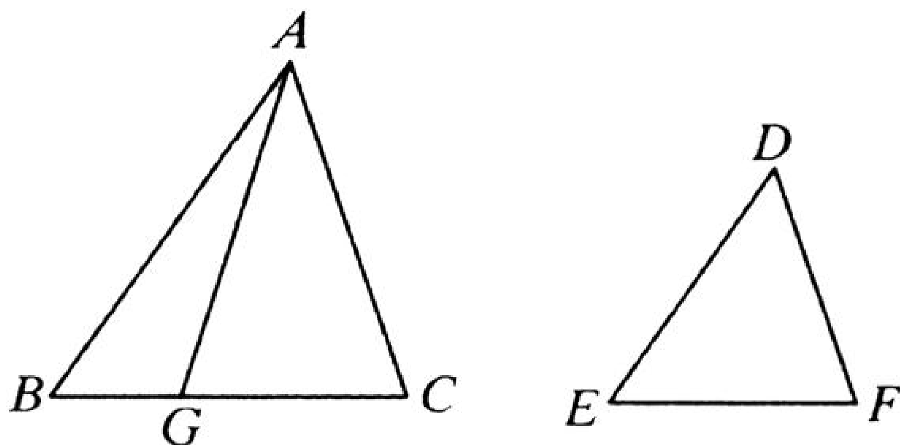
所以：在给定的线段*AB*上作了直线形*AH*相似于已知直线形*CE*，并且位置相似。

作完。

命题19

…

相似三角形互比如同其对应边的二次比。



设：有两相似三角形*ABC*、*DEF*，在*B*处的角等于在*E*处的角，让*AB*比*BC*如同*DE*比*EF*。

故：*BC*对应*EF*。[V. 定义11]

那么可以说：三角形*ABC*比三角形*DEF*如同*BC*与*EF*的二次比。

取*BC*、*EF*的比例第三项为*BG*，即*BC*比*EF*如同*EF*比*BG*。[VI. 11]

连接*AG*。

因为：*AB*比*BC*如同*DE*比*EF*，

所以取更比例，*AB*比*DE*如同*BC*比*EF*。[V. 16]

又因：*BC*比*EF*如同*EF*比*BG*，

因此：*AB*比*DE*如同*EF*比*BG*，[V. 11]

所以：在三角形*ABG*、*DEF*中，夹等角的边成互反比例。

因为：这些三角形中各有一个角相等，且夹等角的边成互反比例，它们就是相等的，[VI. 15]

所以：三角形*ABG*等于三角形*DEF*。

又因：*BC*比*EF*如同*EF*比*BG*，

且若三条线段成比例，那么第一条与第三条的比，又如同第一条与第二条的二次比，[V. 定义9]

所以：*BC*与*BG*的比如同*BC*与*EF*的二次比。

因为：*BC*比*BG*如同三角形*ABC*比三角形*ABG*，[VI. 1]

所以：三角形*ABC*比三角形*ABG*是*BC*对*EF*的二次比。

又因：三角形*ABG*等于三角形*DEF*，

所以：三角形*ABC*比三角形*DEF*也是*BC*对*EF*的二次比。

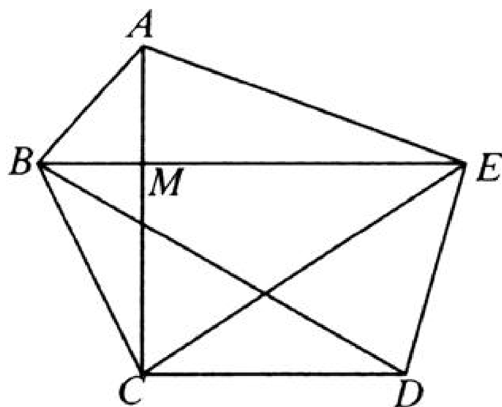
证完。

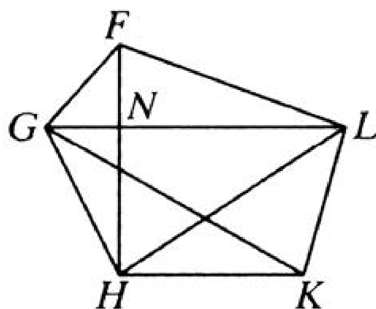
推论 由此可知，假如三条线段成比例，那么第一条与第三条如同画在第一条上的图形比画在第二条上与它相似且有相似位置的图形。

命题20

…

将两个相似多边形分成同样多个相似三角形，并且对应三角形的比如同原形的比；原多边形与多边形的比如同对应边与对应边的二次比。





设：有相似多边形*ABCDE*、*FGHKL*，*AB*与*FG*对应。

那么可以说：多边形*ABCDE*、*FGHKL*可分成同样多个相似三角形；

并且相似三角形的比如同原形的比；

多边形*ABCDE*与多边形*FGHKL*之比如同*AB*与*FG*的二次比。

连接*BE*、*EC*、*GL*、*LH*。

因为：多边形*ABCDE*相似于多边形*FGHKL*，角*BAE*等于角*GFL*，

又因：*BA*比*AE*如同*GF*比*FL*，[VI. 定义1]

所以：*ABE*、*FGL*是具有一个角与一个角相等的两个三角形，并且夹等角的边成比例，则三角形*ABE*与三角形*FGL*是等角的，[VI. 6]

所以：也是相似的。

角*ABE*等于角*FGL*。

因为：多边形是相似的，整个角*ABC*等于整个角*FGH*，

所以：余下的角*EBC*等于角*LGH*。

又因：三角形*ABE*、*FGL*是相似的，

所以：*EB*比*BA*如同*LG*比*FG*，

且因多边形是相似的，所以：*AB*比*BC*如同*FG*比*GH*，

所以：有首末比，*EB*比*BC*如同*LG*比*GH*，[V. 22]

也就是，夹等角*EBC*、*LGH*的边成比例，

所以：三角形*EBC*与三角形*LGH*的各角相等，[VI. 6]

故：三角形*EBC*相似于三角形*LGH*，[VI. 4和定义1]

同理，三角形*ECD*相似于三角形*LHK*，

所以：相似多边形*ABCDE*与*FGHKL*被分成同样个数的相似三角形。

又可证，它们的比如同原形的比，

也就是在这种情况三角形形成比例，*ABE*、*EBC*、*ECD*是前项，此时，*FGL*、*LHG*、*LHK*是它们的后项；

且，多边形*ABCDE*与多边形*FGHKL*的比如同对应边与对应边的二次比，也就是*AB*与*FG*的二次比。

连接*AC*、*FH*。

因为：多边形是相似的，

所以：角*ABC*等于角*FGH*。

又因：*AB*比*BC*如同*FG*比*GH*，

且三角形*ABC*与三角形*FGH*的各角相等，[VI. 6]

所以：角*BAC*等于角*GFH*，角*BCA*等于角*GHF*。

因为：角*BAM*等于角*GFN*，且角*ABM*等于角*FGN*，[I. 32]

所以：余下的角*AMB*等于角*FNG*，

故：三角形*ABM*与三角形*FGN*的各角相等。

类似地，可以证明，三角形*BMC*与三角形*GNH*的各角相等。

因此：有比例，*AM*比*MB*如同*FN*比*NG*，

又有*BM*比*MC*如同*GN*比*NH*，

所以：有首末比，*AM*比*MC*如同*FN*比*NH*。

又因：*AM*比*MC*如同三角形*ABM*比*MBC*，

且如同*AME*比*EMC*，这是因为它们彼此的比如同其底的比，[VI. 1]

所以：前项之一比后项之一如同所有前项的和比所有后项的和，[V. 12]

所以：三角形*AMB*比*BMC*如同*ABE*比*CBE*。

又因：*AMB*比*BMC*如同*AM*比*MC*，

所以：*AM*比*MC*如同三角形*ABE*比三角形*EBC*。

同理：*FN*比*NH*如同三角形*FGL*比三角形*GLH*。

又因：*AM*比*MC*如同*FN*比*NH*，

所以：三角形*ABE*比三角形*BEC*如同三角形*FGL*比三角形*GLH*。

且由更比例，三角形*ABE*比三角形*FGL*如同三角形*BEC*比三角形*GLH*。

同理可证：如果连接*BD*、*GK*，那么三角形*BEC*比三角形*LGH*也如同三角形*ECD*比三角形*LHK*。

又因：三角形*ABE*比三角形*FGL*如同*EBC*比*LGH*，且如同*ECD*比*LHK*，

所以：前项之一比后项之一如同所有前项的和比所有后项的和；[V. 12]

因此：三角形*ABE*比三角形*FGL*如同多边形*ABCDE*比多边形*FGHKL*。

又因：三角形*ABE*比三角形*FGL*的比如同对应边*AB*与*FG*的二次比，这是因为相似三角形之比如同对应边的二次比，[VI. 19]

所以：多边形*ABCDE*比多边形*FGHKL*也如同对应边*AB*与*FG*的二次比。

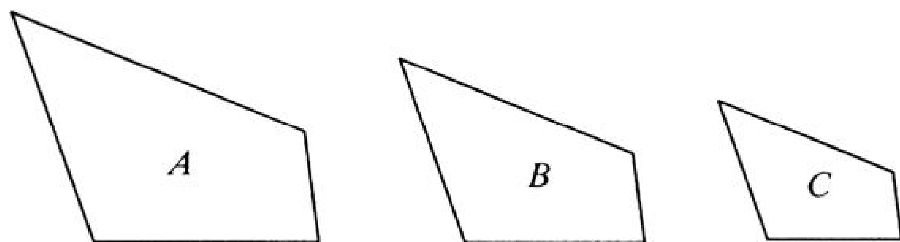
证完。

推论 类似地，可证：有关四边形的情况，形与形之比如同对应边的二次比；之前已证明三角形的情况。故，在一般情况下，相似直线形之比是其对应边的二次比。

命题21

…

与同一直线形相似的图形，它们彼此也相似。



设：直线形*A*、*B*的每一个都与*C*相似。

那么可以说：*A*也与*B*相似。

因为：*A*与*C*相似，它们各角分别相等且夹等角的边成比例，[VI. 定义1]

又因：*B*与*C*相似，它们的各角相等且夹等角的边成比例，

所以：图形*A*、*B*的每一个角都与*C*的各角分别相等且夹等角的边成

比例，

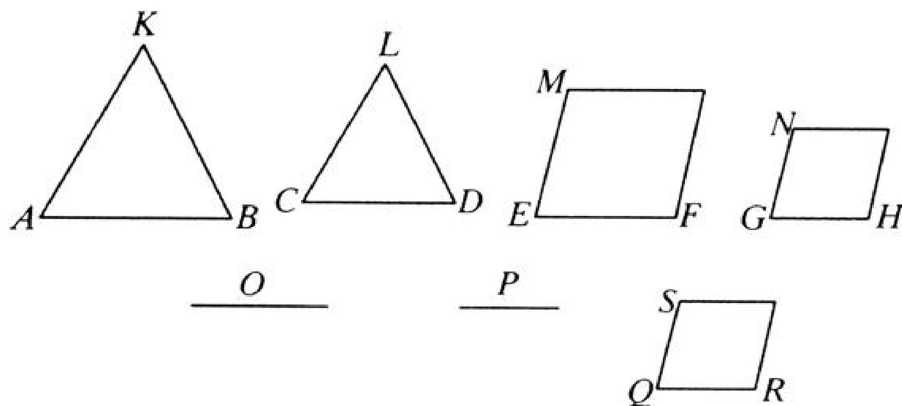
因此：*A*与*B*相似。

证完。

命题22

…

假如四条线段成比例，那么在它们上面作的相似且有相似位置的直线形也成比例；假如在各线段上作的相似且有相似位置的直线形成比例，那么这些线段也成比例。



设：四条线段*AB*、*CD*、*EF*、*GH*成比例，那么：*AB*比*CD*如同*EF*比*GH*。

在*AB*、*CD*上作相似且有相似位置的直线形*KAB*、*LCD*，又在*EF*、*GH*上作相似且有相似位置的直线形*MF*、*NH*。

那么可以说：*KAB*比*LCD*如同*MF*比*NH*。

对*AB*、*CD*取定其比例第三项*O*，

对*EF*、*GH*取定其比例第三项*P*。[VI. 11]

已知，*AB*比*CD*如同*EF*比*GH*，*CD*比*O*如同*GH*比*P*，

那么：取首末比，AB比O如同EF比P。[V. 22]

因为：AB比O如同KAB比LCD，[VI. 19，推论]

又因：EF比P如同MF比NH，

所以：KAB比LCD如同MF比NH。[V. 11]

又设：MF比NH如同KAB比LCD，

那么可以证明：EF比GH不同于AN比CD。

再设：EF比QR如同AB比CD，[VI. 12]

并在QR上作直线形SR和两个直线形MF、NH的任何一个既相似又有相似位置，[VI. 18]

所以：AB比CD如同EF比QR。

在AB、CD上作相似且有相似位置的图形KAB、LCD，

且在EF、QR上作相似且有相似位置的图形MF、SR，

所以：KAB比LCD如同MF比SR。

又因：根据假设，KAB比LCD如同MF比NH，

因此：MF比SR如同MF比NH，[V. 11]

故：MF比图形NH、SR的每一个有相同的比，

因此：NH等于SR。[V. 9]

又因：这也是相似且有相似位置的，

所以：GH等于QR。

又因：AB比CD如同EF比QR，

且QR等于GH，

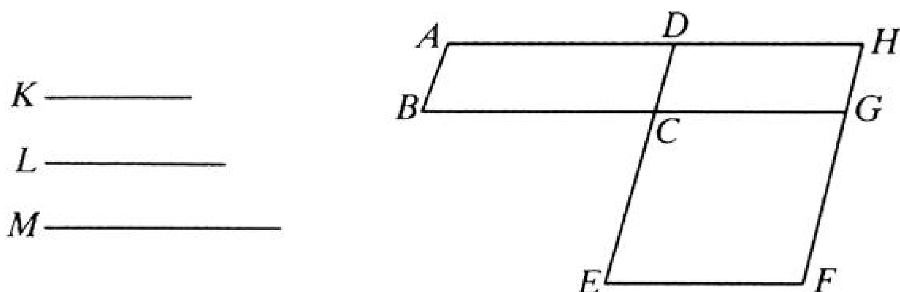
所以：*AB*比*CD*如同*EF*比*GH*。

证完。

命题23

…

等角的平行四边形之比是其边之比的复比。



设：等角平行四边形*AC*、*CF*的角*BCD*等于角*ECG*。

那么可以说：平行四边形*AC*比平行四边形*CF*如同其边之比的复比。

因为：可让*BC*和*CG*在一条直线上，

使*DC*和*CE*也在一条直线上，

画出平行四边形*DG*，从线段*K*出发，找出线段*BC*比*CG*如同*K*比*L*，*DC*比*CE*如同*L*比*M*，[VI. 12]

所以：*K*比*L*与*L*比*M*的比，又如同边与边的比，也就是*BC*比*CG*与*DC*比*CE*。

又因：*K*比*M*如同*K*比*L*和*L*比*M*的复比，

所以：*K*比*M*是边与边的比的复比。

因为：*BC*比*CG*如同平行四边形*AC*比平行四边形*CH*，[VI. 1]

那么：在这个比例中，BC比CG如同K比L，

因此：K比L如同AC比CH。[V. 11]

因为：DC比CE如同平行四边形CH比CF，[VI. 1]

又因：DC比DE如同L比M，

所以：L比M如同平行四边形CH比平行四边形CF，[V. 11]

所以：K比L如同平行四边形AC比平行四边形CH。

因为：L比M如同平行四边形CH比平行四边形C，

所以，有首末比：K比M如同平行四边形AC比平行四边形CF。

又因：K与M的比如同边与边的比的复比，

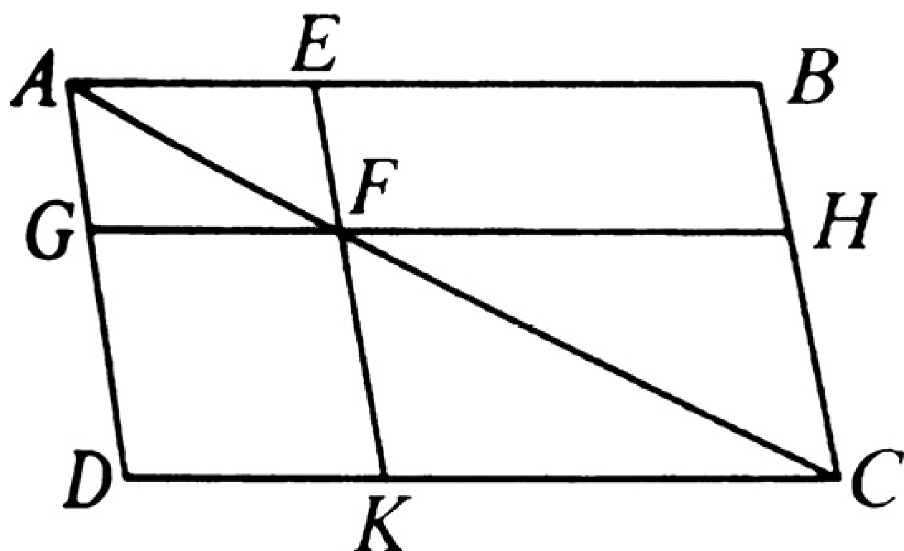
所以：AC比CF也是边与边的比的复比。

证完。

命题24

…

在任何平行四边形中，与它有共同对角线的平行四边形都相似于原平行四边形，且彼此也相似。



设：在平行四边形*ABCD*中，*AC*是其对角线；

让*EG*、*HK*是跨在*AC*两头的两个小平行四边形。

那么可以说：*EG*、*HK*的每一个都相似于平行四边形*ABCD*，并且彼此相似。

因为：*EF*平行于*BC*，是三角形*ABC*的一条边，那么有比例，*BE*比*EA*如同*CF*比*FA*，[VI. 2]

又因：*FG*平行于*CD*，是三角形*ACD*的一条边，那么有比例，*CF*比*FA*如同*DG*比*GA*，[VI. 2]

并且已经证明*CF*比*FA*如同*BE*比*EA*，

所以：*BE*比*EA*如同*DG*比*GA*。

又有，由合比例：*BA*比*AE*如同*DA*比*AG*，[V. 18]

又有，取更比例：*BA*比*AD*如同*EA*比*AG*，[V. 16]

所以：在平行四边形*ABCD*与*EG*中，夹公共角*BAD*的四个边成比例。

因为：GF平行于DC，角AFG等于角DCA，

且角DAC是三角形ADC与AGF的公共角，

所以：三角形ADC与三角形AGF的各角相等。

同理可证：三角形ACB也与三角形AFE的各角相等，

且整体平行四边形$ABCD$和平行四边形EG的各角也相等，

所以，有比例：

AD比DC如同AG比GF；

DC比CA如同GF比FA；

AC比CB如同AF比FE；

且有，CB比BA如同FE比EA。

又因，已证明：

DC比CA如同GF比FA，

且AC比CB如同AF比FE，

所以，有首末比例：DC比CB如同GF比FE，[V. 22]

因此：在平行四边形$ABCD$与EG中，夹等角的四个边成比例，

所以：平行四边形$ABCD$相似于平行四边形EG。[VI. 定义1]

同理可证：平行四边形$ABCD$也相似于平行四边形KH，

因此：平行四边形EG、HK的每一个都相似于$ABCD$。

又因：相似于同一直线形的图形也彼此相似，[VI. 21]

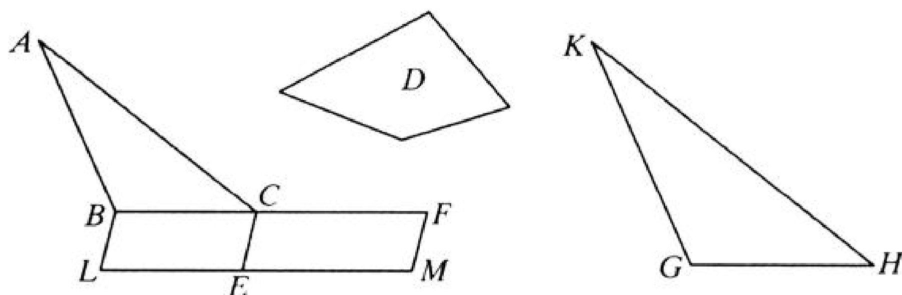
所以：平行四边形EG也相似于平行四边形HK。

证完。

命题25

…

求作一个图形相似于一个已知直线形且等于另外一个已知直线形。



设：已知直线形*ABC*；

要求：作一个图形与它相似，并且等于另一个图形*D*，

即，求作一个图形使它相似于*ABC*又等于*D*。

对*BC*贴合一个平行四边形*BE*，使其等于三角形*ABC*，[I. 44]

对*CE*贴合一平行四边形*CM*使它等于*D*，其中角*FCE*等于角*CBL*，[I. 45]

所以：*BC*与*CF*在一条直线上，*LE*和*EM*在一条直线上。

取*GH*使它成为*BC*、*CF*的比例中项，[VI. 13]

在*GH*上作*KGH*相似于*ABC*且有相似位置，[VI. 18]

所以：*BC*比*GH*如同*GH*比*CF*。

又设：若三条线段成比例，第一个比第三个如同第一个上的图形比在第二个上与它相似且有相似位置的图形，[VI. 19，推论]

所以：*BC*比*CF*如同三角形*ABC*比三角形*KGH*。

又因：*BC*比*CF*也如同平行四边形*BE*比平行四边形*EF*，[VI. 1]

所以：三角形*ABC*比三角形*KGH*如同平行四边形*BE*比平行四边形*EF*，

所以：取更比例，三角形*ABC*比平行四边形*BE*如同三角形*KGH*比平行四边形*EF*。[V. 16]

因为：三角形*ABC*等于平行四边形*BE*，

所以：三角形*KGH*等于平行四边形*EF*。

又因：平行四边形*EF*等于*D*，

所以：*KGH*等于*D*。

又因：*KGH*相似于*ABC*，

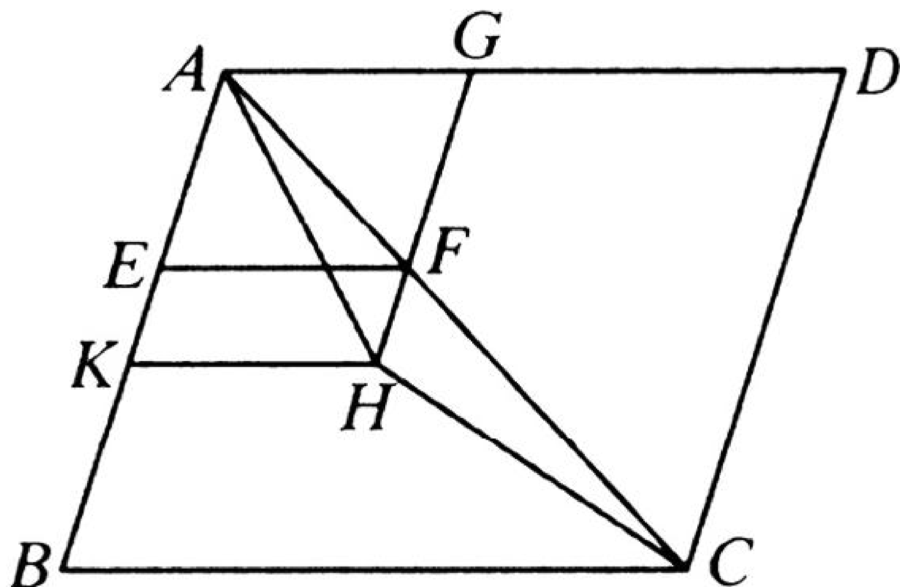
所以：同一个图形*KGH*既相似于已知直线形*ABC*，又等于另一个已知图形*D*。

证完。

命题26

…

假如在一个平行四边形中去掉一个与原形相似、有相似位置，且有一个公共角的平行四边形，那么它与原平行四边形有共线的对角线。



在平行四边形*ABCD*中去掉一个平行四边形*AF*，它相似于*ABCD*，有相似位置，且还有公共角*DAB*。

那么可以说：*ABCD*与*AF*有共线的对角线。

因为，如不是这样，那么：

让*AHC*是＜*ABCD*的＞对角线，延长*GF*至*H*，过*H*作*HK*平行于直线*AD*、*BC*中的一条，[I. 31]

所以：*ABCD*与*KG*有共线的对角线，因此：*DA*比*AB*如同*GA*比*AK*。[VI. 24]

又因：*ABCD*与*EG*相似，

所以：*DA*比*AB*如同*GA*比*AE*，

因此：*GA*比*AK*如同*GA*比*AE*，[V. 11]

因此：*GA*与*AK*、*AE*的每一个相比都有相同的比，

所以：*AE*等于*AK*。[V. 9]

较小的等于较大的，这并不符合实际，

所以：$ABCD$与AF不能没有共线的对角线，

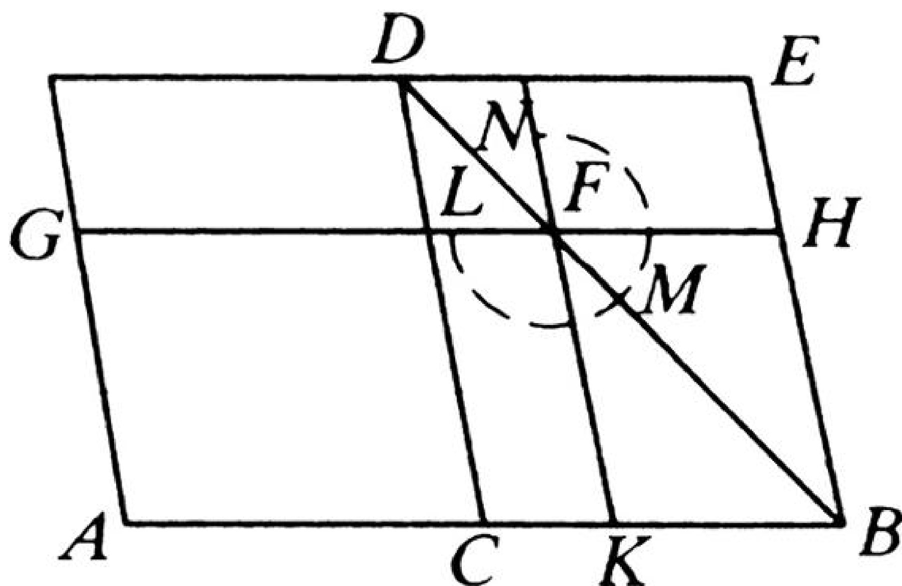
因此：平行四边形$ABCD$与平行四边形AF有共线的对角线。

证完。

命题27

…

在任一贴合于同一线段上的所有平行四边形中，亏缺一个与作在原线段一半上的平行四边形相似且有相似位置的图形。那么在所作的图形中，以作在原线段一半上的平行四边形为最大，并且它相似于去掉的图形。



设：线段AB被C二等分，

对线段AB的一半上所贴合的平行四边形AD，是亏缺在AB一半CB上的平行四边形DB以后而成的。

那么可以说：贴合于AB线上的平行四边形中，以亏缺相似且有相似位置于DB的平行四边形AD最大。

又设：在*AB*上所贴合的平行四边形*AF*，是亏缺着相似且有相似位置于*DB*的平行四边形的图形*FB*而成的。

那么可以说：*AD*大于*AF*。

因为：平行四边形*DB*相似于平行四边形*FB*，它们有共线的对角线，[VI. 26]

设：已经画出了它们的对角线*DB*，图形已作好。

因为：*CF*等于*FE*，[I. 43]

*FB*是公共的。

所以：整体*CH*等于整体*KE*。

又因：*CH*等于*CG*，这是因为*AC*等于*CB*。[I. 36]

因此：*GC*等于*EK*。

将*CF*加在以上各边，

可以得出，整体*AF*等于拐尺形*LMN*。

所以：平行四边形*DB*，也就是*AD*，大于平行四边形*AF*。

证完。

命题28

…

对已知线段上贴合一个等于一已知直线形的平行四边形，并且亏缺一个相似于某个已知图形的平行四边形，这个已知直线形必须不大于在原线段一半上的平行四边形，并且这个平行四边形相似于去掉的图形。

设：已知线段*AB*，已知直线形*C*，

要求：作贴合于*AB*上一个和*C*相等的平行四边形，*C*不大于在*AB*一半上作的平行四边形，这平行四边形又相似于亏缺的图形，而亏缺的图形又相似于已知的平行四边形*D*；

要求：在已知线段*AB*上贴合一个平行四边形等于已知直线形*C*，且这平行四边形也是亏缺一个相似于*D*的平行四边形。

用点*E*二等分*AB*，且在*EB*上作相似于*D*且有相似位置的*EBFG*；[VI. 18]

将平行四边形*AG*画出。

假如：*AG*等于*C*，那么就完成了作图。

因为：在已知线段*AB*上有平行四边形*AG*，它等于已知直线形*C*，

并且是由亏缺相似于*D*的平行四边形的图形*BG*而成，

假设：并非如此，设*HE*大于*C*，

那么：*HE*等于*GB*，*GB*大于*C*。

作*KLMN*等于*GB*与*C*的差，且相似于*D*，与*D*有相似位置。[VI. 25]

又因：*D*相似于*GB*，

所以：KM也相似于GB。[VI. 21]

让KL对应于GE，且LM对应于GF。

因为：GB等于C、KM的和，

因此：GB大于KM，

故：GE大于KL，GF大于LM。

取GO等于KL，GP等于LM，

将平行四边形$OGPQ$画出，使其等于且相似于KM，

因此：GQ也相似于GB，[VI. 21]

所以：GQ与GB有共线的对角线。[VI. 26]

让GQB是它们的对角线，假设图形已经画好。

因为：BG等于C、KM的和，

且在它们中GQ等于KM，

因此：其余部分，也就是拐尺形UWV等于其余部分C。

因为：PR等于OS，将QB加在以上各边，

那么：整体PB等于整体OB。

又因：OB等于TE，这是因为边AE等于边EB，[I. 36]

所以：TE等于PB。

将OS加在以上各边，

所以：整体TS等于整体拐尺形VWU。

又因：已经证明拐尺形VWU等于C，

所以：*TS*等于*C*，

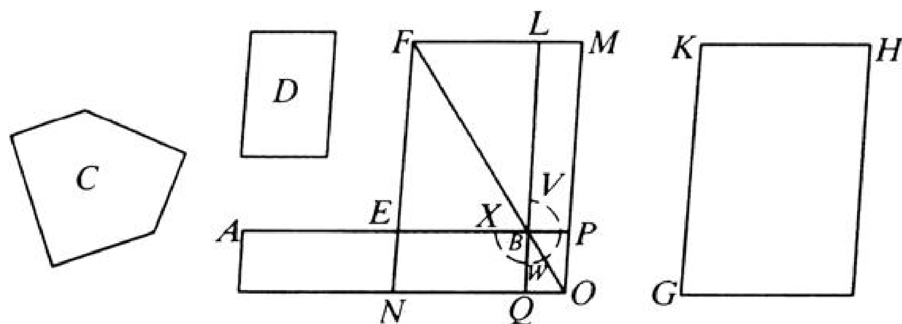
所以：对已知线段*AB*贴合了等于已知直线形*C*，并且由亏缺相似于*D*的平行四边形*QB*而成的平行四边形*ST*。

作完。

命题29

…

对已知线段上贴合一个等于已知直线形的平行四边形，且超出一个平行四边形相似于一个已知平行四边形。



设：已知线段*AB*，直线形*C*，

在*AB*上贴合一个平行四边形等于*C*；

且超出的平行四边形相似于平行四边形*D*。

要求：在线段*AB*上贴合一个平行四边形，使它等于直线形*C*，且在超出部分上的平行四边形相似于*D*。

又设：将*AB*平分于*E*。

在*EB*上作相似于*D*，并且与它有相似位置的平行四边形*BF*；作*GH*等于*BF*与*C*的和，*GH*与*D*相似且有相似位置。[VI. 25]

让*KH*对应*FL*，*KG*对应*FE*。

因为：*GH*大于*FB*，

所以：*KH*大于*FL*，*KG*大于*FE*。

延长*FL*、*FE*，让*FLM*等于*KH*，*FEN*等于*KG*，

画出平行四边形*MN*，

因此：*MN*等于且相似于*GH*。

又因：*GH*相似于*EL*，

所以：*MN*也相似于*EL*，[VI. 21]

所以：*EL*与*MN*有共线的对角线，[VI. 26]

那么：作了它们的对角线*FO*，图形也已作出。

因为：*GH*等于*EL*与*C*的和，且*GH*等于*MN*，

所以：*MN*等于*EL*与*C*的和。

由以上各边减去*EL*，

所以：余下的，拐尺形*XWV*等于*C*。

又因：*AE*等于*EB*，*AN*等于*NB*，[I. 36]

也就是*AN*等于*LP*，[I. 43]

将*EO*加在以上各边，

所以：整体*AO*等于拐尺形*VWX*。

因为：拐尺形*VWX*等于*C*，

所以：*AO*等于*C*。

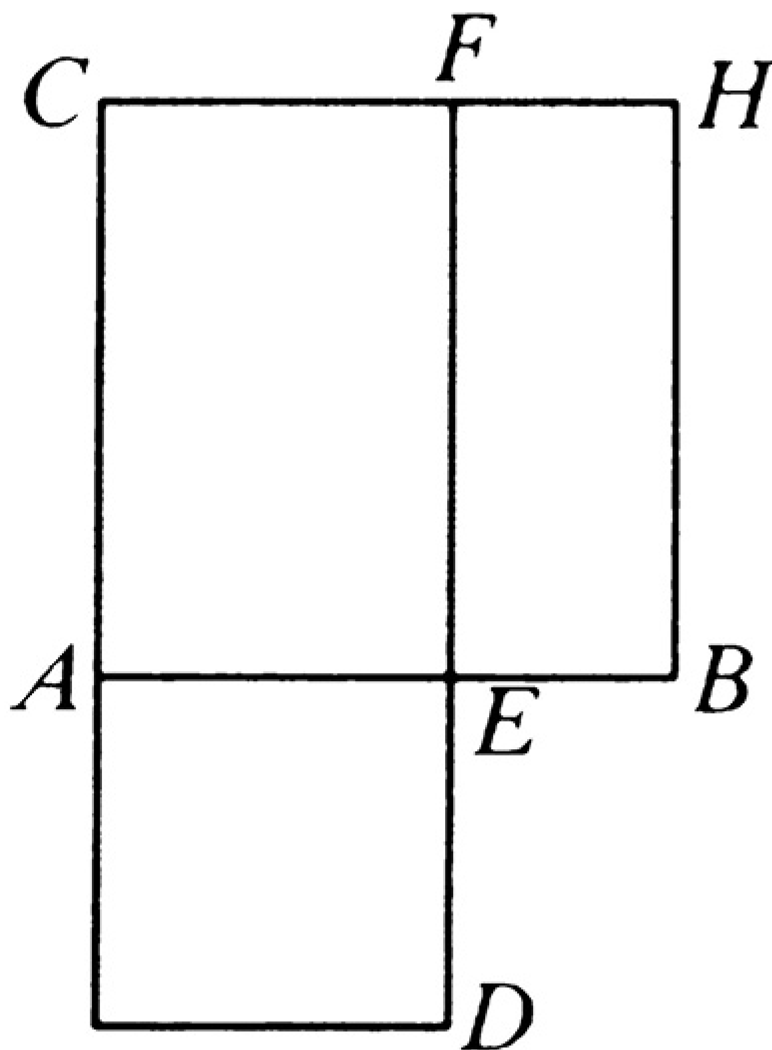
因此：对已知线段*AB*贴合了一个平行四边形*AO*，等于已知直线形*C*。且超出一个平行四边形*QP*相似于*D*，这是因为，*PQ*相似于*EL*。[VI.

作完。

命题30

…

将一个已知线段分成中外比。



设：已知线段AB。

要求：分AB成中外比。

在AB上作正方形BC，在AC及其延线上作平行四边形CD等于BC，在延线上的图形AD相似于BC。[VI. 29]

此时，BC是正方形，

所以：AD也是正方形。

又因：正方形BC等于平行四边形CD，由各边减去CE，

那么：余量BF等于余量AD。

又因：它们各角相等，

所以：在BF、AD中夹等角的边成互反比例，[VI. 14]

因此：FE比ED如同AE比EB。

因为：FE等于AB，且ED等于AE，

所以：BA比AE如同AE比EB。

又因：AB大于AE，

所以：AE大于EB，

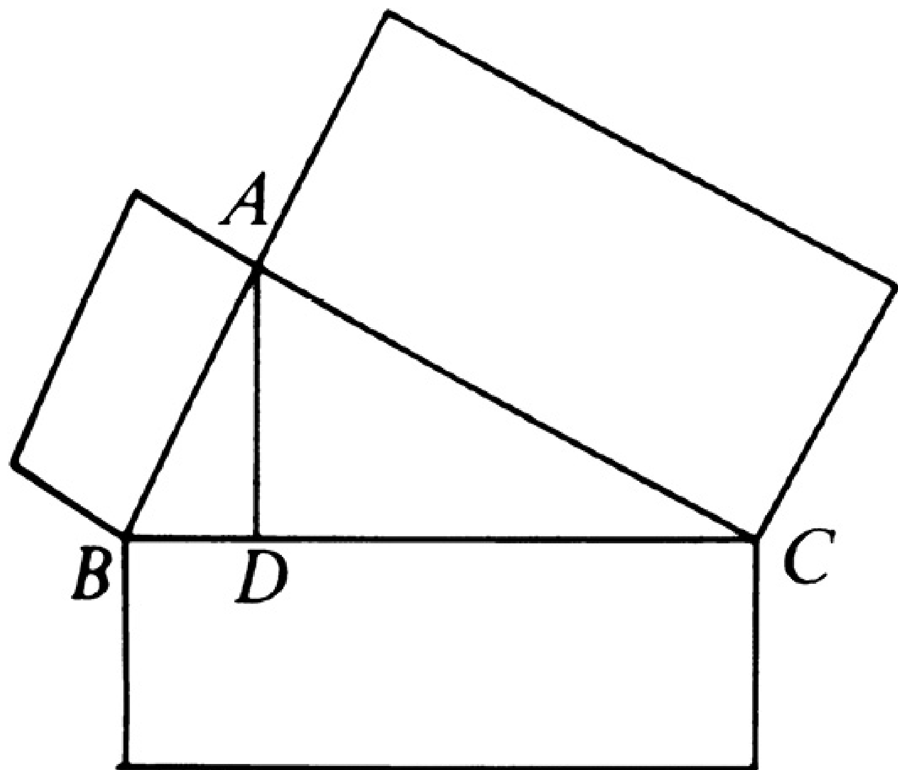
因此：线段AB被点E分成中外比，AE是较大的线段。

作完。

命题31

…

在直角三角形中，对直角的边上所作的图形等于夹直角边上所作与前图形相似且有相似位置的二图形的和。



设：在直角三角形*ABC*中，*BAC*为直角。

那么可以说：在*BC*上的图形等于在*BA*、*AC*上所作与前图形相似，并有相似位置的二图形的和。

又设：在直角三角形*ABC*中，*AD*是从顶点*A*到底*BC*的垂线。

三角形*ABD*、*ADC*在垂线两边，都与*ABC*相似，它们也彼此相似。[VI. 8]

因为：*ABC*相似于*ABD*，

所以：*CB*比*BA*如同*AB*比*BD*。[VI. 定义1]

又因：三条线段成比例，

且第一条比第三条如同第一条上的图形比作在第二条上与它相似，并有相似位置的图形，[VI. 19，推论]

所以：*CB*比*BD*如同*CB*上的图形比作在*BA*上与它相似且有相似位置的图形。

同理可证：*BC*比*CD*如同*BC*上的图形比*CA*上的图形，

因此：有*BC*比*BD*、*DC*的和如同*BC*上的图形比在*BA*、*AC*上并且与*BC*上图形相似，并有相似位置的图形的和。

又因：*BC*等于*BD*、*DC*的和，

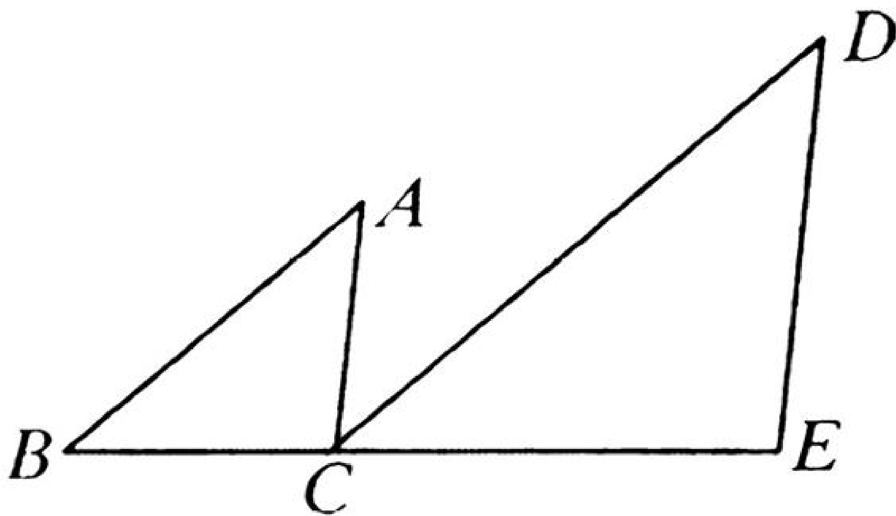
所以：*BC*上的图形等于*BA*、*AC*上与前图形相似且有相似位置的图形的和。

证完。

命题32

…

假如在两个三角形中，一个三角形中的一个角的两边与另一个三角形的一个角的两边成比例，且对应边平行，那么这两个三角形的第三边在同一条直线上。



设：*ABC*、*DCE*是两个三角形，它们的两边*BA*、*AC*与两边*DC*、*DE*

成比例，

也就是，AB比AC如同DC比DE，且AB平行于DC，AC平行于DE；

那么可以说：BC与CE在同一直线上。

因为：AB平行于DC，且直线AC与它们相交，

那么：错角BAC、ACD彼此相等。[I. 29]

同理可证：角CDE等于角ACD，

所以：角BAC等于角CDE。

因为：ABC、DCE是两个三角形，它们的一个角等于一个角，在A处的角等于在D处的角，

并且夹等角的边成比例，

所以：BA比AC如同CD比DE，

所以：三角形ABC与三角形DCE的各角相等，[VI. 6]

因此：角ABC等于角DCE。

由于已经证明，角ACD等于角BAC，

所以：整体角ACE等于两个角ABC、BAC的和。

将角ACB加在以上各边，

那么：角ACE、ACB的和等于角BAC、ACB、CBA的和。

又因：角BAC、ABC、ACB的和等于两直角，[I. 32]

所以：角ACE、ACB的和等于两直角，

所以：在直线AC上的C点处，有两直线BC、CE不在AC的同侧，而成邻角ACE与ACB，它们的和等于两直角，

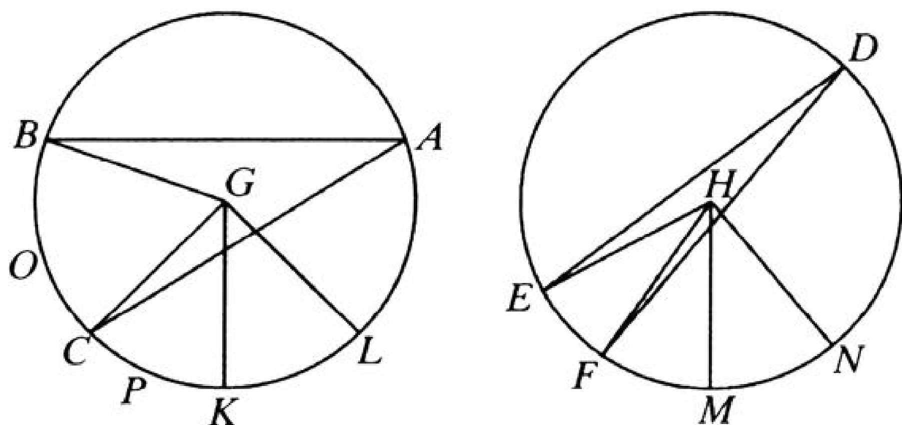
因此：BC与CE在一直线上。[I. 14]

证完。

命题33

…

在等圆中的圆心角或圆周角的比，又如同它们所对弧的比。



设：ABC、DEF是等圆，且角BGC、EHF是圆心G、H处的角，角BAC、EDF是圆周角。

那么可以说：弧BC比弧EF如同角BGC比角EHF，也如同角BAC比角EDF。

因为：取等于弧BC的任意多个相邻的弧CK、KL，

可取等于弧EF的任意多个相邻的弧FM、MN；

连接：GK、GL、HM、HN，

因为：弧BC、CK、KL彼此相等，

角BGC、CGK、KGL也彼此相等，[III. 27]

所以：无论弧BL是BC的几倍，

那么：角BGL也是角BGC的同样多倍。

同理可证：无论弧NE是EF的几倍，那么角NHE也是角EHF的同样几倍。

假如弧BL等于弧EN，那么角BGL等于EHN；[III. 27]

假如弧BL大于弧EN，那么角BGL大于角EHN；

假如弧BL小于弧EN，那么角BGL小于角EHN，

所以：有四个量，两个弧BC、EF及两个角BGC、EHF，

取定弧BC及角BGC的同倍量，它们是弧BL及角BGL。

取定弧EF及角EHF的同倍量，也就是弧EN与角EHN。

因为，已经证明：假如弧BL大于弧EN，那么角BGL大于角EHN；

假如弧BL等于弧EN，那么角BGL等于角EHN；

假如弧BL小于弧EN，那么角BGL小于角EHN。

所以：弧BC比EF如同角BGC比角EHF。[V. 定义5]

又因：角BGC比角EHF如同角BAC比角EDF，且它们分别是二倍关系，

所以：弧BC比弧EF如同角BGC比角EHF，又如同角BAC比角EDF。

证完。

卷VII

定义

01 每一个事物都是作为一个单位而存在。并称之为1。

02 一个数是由许多单位合成的。

03 一个较小数为一个较大数的一部分，当它能量尽较大者。

04 一个较小数为一个较大数的几部分，当它量不尽较大者。

05 若较大数能被较小数量尽，那么它是较小数的倍数。

06 偶数是能被分成两个相等部分的数。

07 奇数是不能被分成两个相等部分的数，或者它和一个偶数相差一个单位。

08 偶倍偶数是用一个偶数量尽它得偶数的数。

09 偶倍奇数是用一个偶数量尽它得奇数的数。

10 奇倍奇数是用一个奇数量尽它得奇数的数。

11 素数是只能用单位1量尽的数。

12 互素的数是只能被作为公度的一个单位量尽的几个数。

13 合数是能被某数量尽的数。

14 互为合数的数是能被作为公度的某数量尽的几个数。

15 所谓一个数乘一个数，就是被乘数自身相加多少次而得出的某数，这相加的个数是另一个数中单位的个数。

16 两数相乘得出的数称为面数，其两边就是相乘的两数。

17 三数相乘得出的数称为体数，其三边就是相乘的三数。

18 平方数是两相等数相乘所得之数，或者是由两相等数构成的。

19 立方数是两相等数相乘再乘此等数而得的数，或者是由三相等数构成的。

20 当第一数是第二数的某倍、某一部分或某几部分，与第三数是第四数的同样倍数、同一部分或者相同的几部分，那么这四个数成比例。

21 两相似面数和两相似体数是其边成比例的。

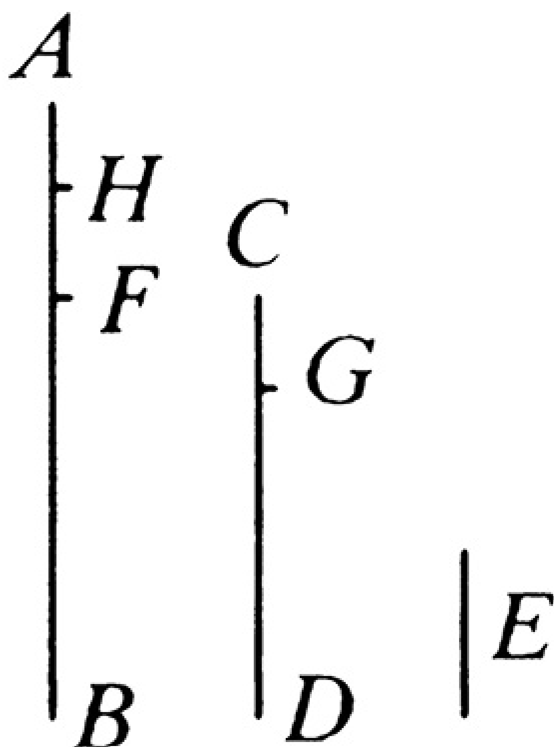
22 完全数是等于其自身所有部分之和的数。

命题

命题1

…

如果有不相等的两个数，依次从大数中不断地减去小数，假如余数总是量不尽它前面一个数，直到最后的余数为一个单位，那么这两个数互为素数。



设：有不相等的两个数*AB*、*CD*。

从大数中不断地减去小数，如果余数总量不尽它前面一个数，直到最后的余数为一个单位。

那么可以说：*AB*、*CD*是互素的。也就是只有一个单位量尽*AB*、

CD。

因为：假如*AB*、*CD*不互素，那么就有某数量尽它们，

设：量尽它们的数为*E*。

用*CD*量出*BF*，其余数*FA*小于*CD*。

又设：*AF*量出*DG*，其余数*GC*小于*AF*，用*GC*量出*FH*，

此时，余数为一个单位*HA*。

因为：*E*量尽*CD*，并且*CD*量尽*BF*，

所以：*E*也量尽*BF*。

因为：*E*也量尽整体*BA*，

所以：它也量尽余数*AF*。

又因：*AF*量尽*DG*，

所以：*E*也量尽*DG*。

因为：*CG*量尽*FH*，

所以：*E*也量尽*FH*。

且已经证明：*E*量尽整体*FA*，因此它也量尽余数，也就是单位*AH*。

又因：*E*是一个数，这不符合实际，

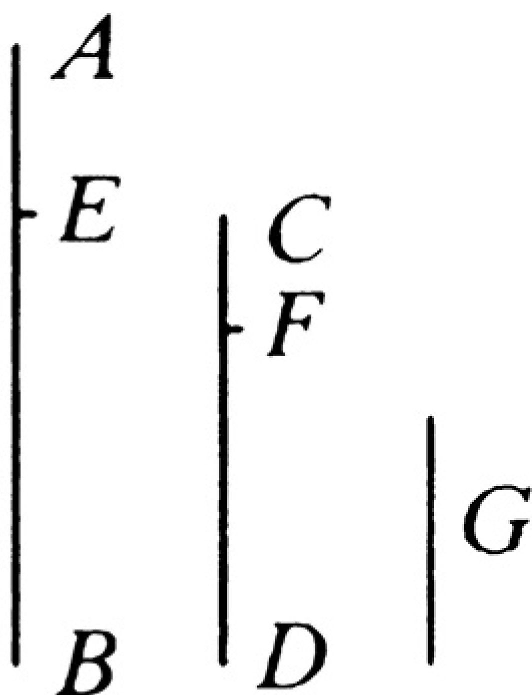
所以：没有数可以同时量尽*AB*、*CD*，

因此：*AB*、*CD*是互素的。[VII. 定义12]

证完。

命题2

已知两个不互素的数，求它们的最大公度数。



设：两个不互素的数为*AB*、*CD*。

求：*AB*、*CD*的最大公度数。

假如：*CD*量尽*AB*，此时它也量尽它自己，

因此：*CD*就是*CD*、*AB*的一个公度数。

因为：没有比*CD*更大的数能量尽*CD*，

所以：*CD*也是最大公度数。

因为：假如*CD*量不尽*AB*，则从*AB*、*CD*中的较大者中不断地减去较小者，

那么：将有某个余数能量尽它前面一个。

这最后的余数不是一个单位，否则*AB*、*CD*就是互素的，[VII. 1]

这与假设相矛盾，

所以：某数将是量尽它前面的一个余数。

假设：*CD*量出*BE*，余数*EA*小于*CD*，

*EA*量出*DF*，余数*FC*小于*EA*，*CF*量尽*AE*。

因为：*CF*量尽*AE*，*AE*量尽*DE*，

所以：*CF*也量尽*DF*。

又因：它也量尽它自己，

所以：它量尽整体*CD*。

因为：*CD*量尽*BE*，

所以：*CF*也量尽*BE*。

又因：*CF*也量尽*EA*，

所以*CF*也量尽整体*BA*。

因为：*CF*也量尽*CD*，

所以：*CF*量尽*AB*、*CD*。

因此：*CF*是*AB*、*CD*的一个公度数。

其次可证，它也是最大公度数。

因为：假如*CF*不是*AB*、*CD*的最大公度数，

则有大于*CF*的某数将量尽*AB*、*CD*。

设：量尽它们的数是*G*。

因为：G量尽CD，CD量尽BE，

所以：G也量尽BE。

又因：它也量尽整体BA，

所以：它也量尽余数AE。

因为：AE量尽DF，

所以：G也量尽DF。

又因：它也量尽整体DC，

所以：它也量尽余数CF，也就是较大的数量尽较小的数。这不符合实际，

因此：没有大于CF的数能量尽AB、CD，

所以：CF是AB、CD的最大公度数。

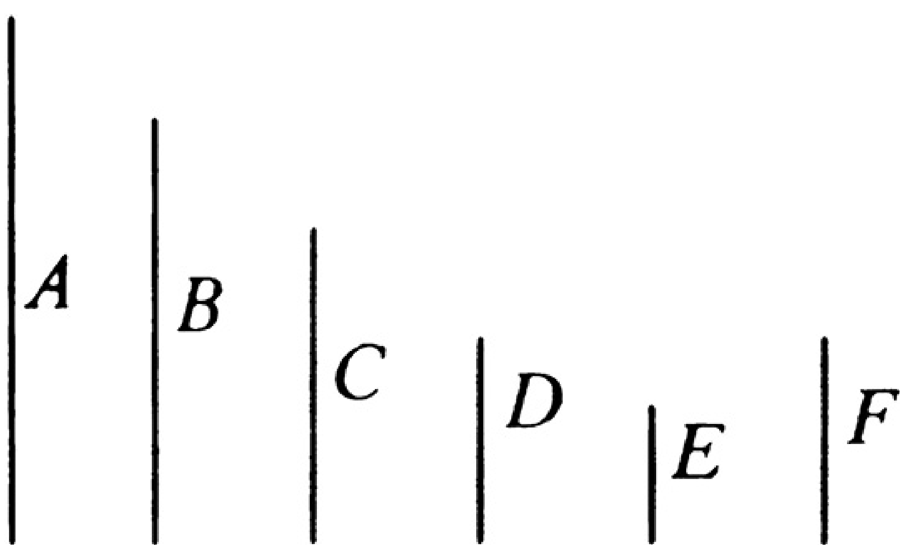
证完。

推论 由此很明显，假如一个数量尽两数，则它也量尽两数的最大公度数。

命题3

…

已知三个不互素的数。求它们的最大公度数。



设：A、B、C是已知三个不互素的数。

求：A、B、C的最大公度数。

设：D为两数A、B的最大公度数。[VII. 2]

那么：D要么量尽要么量不尽C。

先假设：D量尽C。

因为：它也量尽A、B，

所以：D量尽A、B、C，也就是D是A、B、C的一个公度数。

同时：可以证明它还是最大公度数。

假如：D不是A、B、C的最大公度数。

那么：一定有大于D的某个数将量尽A、B、C。

设：量尽它们的数为E。

因为：E量尽A、B、C，

所以：它也量尽A、B，进而它也量尽A、B的最大公度数。[VII. 2，

推论]

又因：A、B的最大公度数是D，

所以：E量尽D，

较大数量尽较小数。这并不符合实际，

所以：没有大于D的数能量尽数A、B、C，

因此：D是A、B、C的最大公度数。

又设：D量不尽C。

先要证明：C、D不互素。

因为：A、B、C不互素，就必然有某个数能量尽它们。

能够量尽A、B、C的某数也量尽A、B，

并量尽A、B的最大公度数D。[VII. 2，推论]

又因：它也量尽C，

所以：这个数同时量尽数D、C，

因此：D、C不互素。

再设：已得到它们的最大公度数E。[VII. 2]

因为：E量尽D，D量尽A、B，

所以：E也量尽A、B。

又因：它也量尽C，

所以：E量尽A、B、C。

因此：E是A、B、C的一个公度数。

其次，再次证明：*E*也是最大公度数。

因为：假如*E*不是*A*、*B*、*C*的最大公度数，

那么：就会有大于*E*的某数*F*量尽数*A*、*B*、*C*。

假如*F*量尽*A*、*B*、*C*，那么它也量尽*A*、*B*，

因此：它也量尽*A*、*B*的最大公度数。[VII. 2，推论]

因为：*A*、*B*的最大公度数是*D*，

所以：*F*量尽*D*。

又因：它也量尽*C*，那么它也量尽*D*、*C*，从而量尽*D*、*C*的最大公度数，[VII. 2，推论]

又因：*D*、*C*的最大公度数是*E*，

所以：*F*量尽*E*，较大数量尽较小数。这是不符合实际的，

所以：没有大于*E*的数量尽*A*、*B*、*C*，

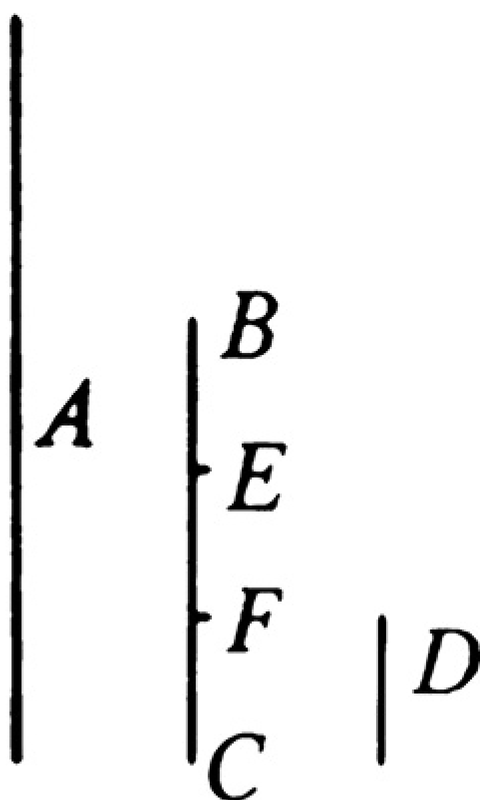
因此：*E*是*A*、*B*、*C*的最大公度数。

证完。

命题4

…

较小的数是较大的数的一部分或几部分。



设：A、BC是两个数，并且BC是较小的数。

那么可以说：BC是A的一部分或几部分。

因为：A、BC要么互素，要么不互素，

先设：A、BC是互素的。

假如：分BC为若干单位，在BC中的每个单位是A的一部分，

那么：BC是A的几部分。

再假设：A、BC不互素，

那么：BC要么量尽，要么量不尽A。

假如：BC量尽A，

那么：BC是A的一部分。

假如：BC量不尽A，

那么：可求得，A、BC的最大公度数是D。[VII. 2]

让BC被分为等于D的一些数，就是BE、EF、FC。

因为：D量尽A，

所以：D是A的一部分。

又因：D等于数BE、EF、FC的每一个，

所以：BE、EF、FC的每一个也是A的一部分，

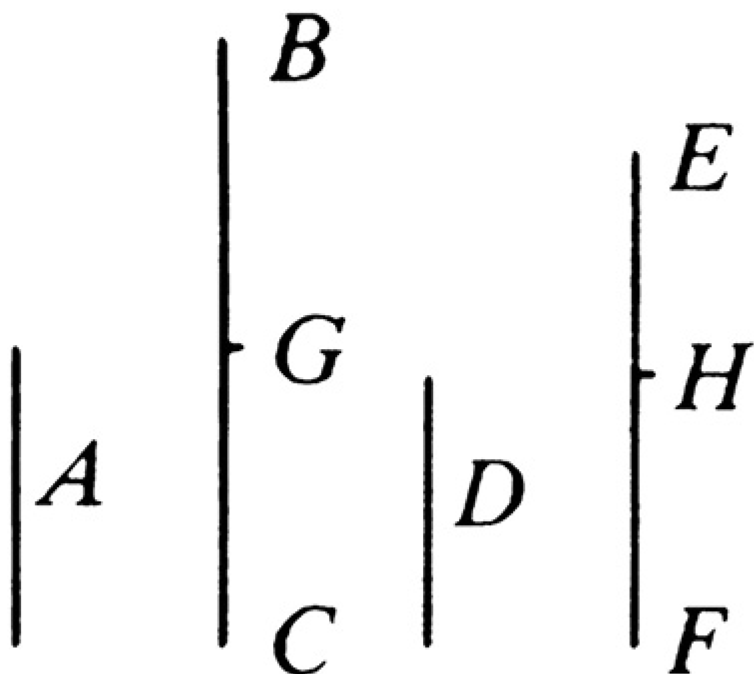
因此：BC是A的几部分。

证完。

命题5

…

如果一小数是一大数的一部分，并且另一小数是另一大数的同样一部分。那么两小数之和也是两大数之和的一部分。并且与小数是大数的部分相同。



设：数A是BC的一部分。并且另一数D是另一数EF的一部分，与A是BC的部分相同。

那么可以说：A、D之和也是BC、EF之和的一部分，且与A是BC的部分相同。

因为：不管A是BC怎样的一部分，D也是EF的同样一部分，

所以：在BC中有多少个等于A的数，在FE中就有同样多少个等于D的数。

将BC分为等于A的数，也就是BG、GC，

将EF分为等于D的数，也就是EH、HF，

因此：BG、GC的个数等于EH、HF的个数。

因为：BG等于A，EH等于D，

所以：BG、EH之和等于A、D之和。

同理可得：*GC*、*HF*之和等于*A*、*D*之和，

所以：在*BC*中有多少个等于*A*的数，在*BC*、*EF*之和中就有同样多少个等于*A*、*D*之和的数，

因此：不管*BC*是*A*的多少倍，*BC*与*EF*之和也是*A*与*D*之和的同样倍数，

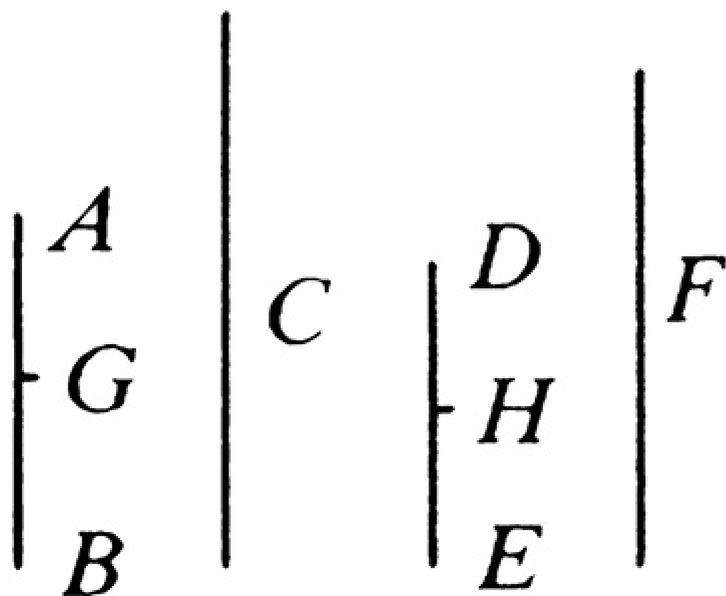
所以：无论*A*是*BC*怎样的一部分，也有*A*、*D*之和是*BC*、*EF*之和的同样一部分。

证完。

命题6

…

如果一数是另一数的几部分，且另一个数是另一个数的同样几部分，那么它们的和也是另外两数和的几部分，且与一数是一数的几部分相同。



设：数*AB*是数*C*的几部分，另一个数*DE*是另一个数*F*的几部分，且与*AB*是*C*的几部分相同。

那么可以说：*AB*、*DE*之和也是*C*、*F*之和的几部分，且与*AB*是*C*的几部分相同。

因为：不管*AB*是*C*的怎样的几部分，*DE*也是*F*的同样几部分，

所以：在*AB*中有多少个*C*的一部分，在*DE*中就有同样多个*F*的一部分。

将*AB*分为*C*的几个一部分，也就是*AG*、*GB*；

将*DE*分成*F*的几个一部分，也就是*DH*、*HE*，

那么：*AG*、*GB*的个数将等于*DH*、*HE*的个数。

因为：*AG*是*C*无论怎样的一部分，

那么：*DH*也是*F*的同样一部分，

因此：*AG*是*C*无论怎样的一部分，

那么：*AG*、*DH*之和也是*C*、*F*之和的同样一部分。[VII. 5]

同理可证：不管*GB*是*C*怎样的一部分，

那么：*GB*、*HE*之和也是*C*、*F*之和的同样一部分，

所以：无论*AB*是*C*的怎样几部分，

那么：*AB*、*DE*之和也是*C*、*F*之和的同样几部分。

证完。

命题7

…

假如一个数是另一个数的一部分，与其一减数是另一减数的部分相同，那么余数也是另一余数的一部分，且与整个数是另一整个数的一部分相

同。



设：数AB是CD的一部分，这一部分与减数AE是减数CF的一部分相同。

那么可以说：余数EB也是余数FD的一部分，与整个数AB是整个数CD的一部分相同。

因为：不管AE是CF怎样的一部分，可设EB也是CG同样的一部分，

因为：不管AE是CF怎样的一部分，

那么：EB也是CG同样的一部分，

因此：不管AE是CF怎样的一部分，AB也是GF同样的一部分。[VII.5]

又，由于之前假设：不管AE是CF怎样的一部分，AB也是CD同样的一部分。

所以：不管AB是GF怎样的一部分，它也是CD同样的一部分，

因此：GF等于CD。

设：从以上每个中减去CF，得出余数GC等于余数FD。

因为：不管AE是CF怎样的一部分，EB也是GC同样的一部分，

又因：GC等于FD，

所以：不管AE是CF怎样的一部分，EB也是FD同样的一部分。

因为：不管AE是CF怎样的一部分，AB也是CD同样的一部分，

因此：余数EB也是余数FD的一部分，与整个数AB是整个数CD的一

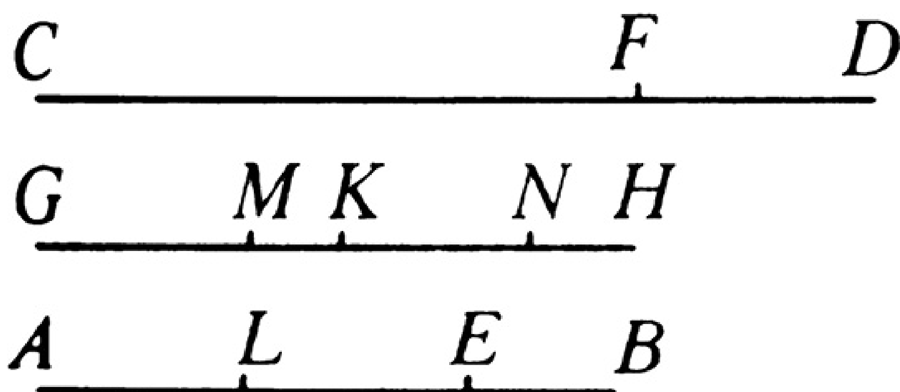
部分相同。

证完。

命题8

…

假如一个数是另一个数的几部分，与其一减数是另一减数的几部分相同，那么其余数也是另一余数的几部分，且与整个数是另一个整个数的几部分相同。



设：数*AB*是*CD*的几部分，与减数*AE*是减数*CF*的几部分相同。

那么可以说：余数*EB*是余数*FD*的几部分，并与整个*AB*是整个*CD*的几部分相同。

取*GH*等于*AB*。

那么：不管*GH*是*CD*怎样的几部分，*AE*也是*CF*同样的几部分。

设：分*GH*为*CD*的几个部分，也就是*GK*、*KH*；分*AE*为*CF*的几个一部分，也就是*AL*、*LE*，

那么：*GK*、*KH*的个数等于*AL*、*LE*的个数。

因为：不管*GK*是*CD*怎样的一部分，

那么：*AL*也是*CF*同样的一部分。

又因：*CD*大于*CF*，

所以：*GK*大于*AL*。

作*GM*等于*AL*。

那么：不管*GK*是*CD*怎样的一部分，*GM*也是*CF*同样的一部分，

所以：余数*MK*是余数*FD*的一部分，与整个数*GK*是整个数*CD*的一部分相同。[VII. 7]

因为：不管*KH*是*CD*怎样的一部分，*EL*也是*CF*同样的一部分，

又因：*CD*大于*CF*，

所以：*KH*大于*EL*。

作*KN*等于*EL*，

所以：不管*KH*是*CD*怎样的一部分，*KN*也是*CF*同样的一部分，

所以：余数*NH*是余数*FD*的一部分，与整个*KH*是整个*CD*的一部分相同。[VII. 7]

又因，已经证明：余数*MK*是余数*FD*的一部分，与整个*GK*是整个*CD*的一部分相同，

所以：*MK*、*NH*之和是*DF*的几部分，与整个*HG*是整个*CD*的几部分相同。

又因：*MK*、*NH*的和等于*EB*，而*HG*等于*BA*，

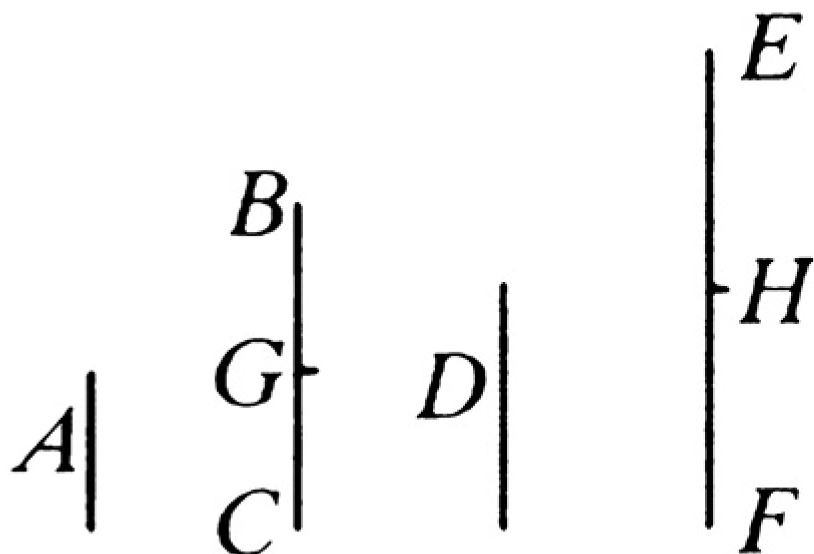
因此：余数*EB*是余数*FD*的几部分，与整个*AB*是整个*CD*的几部分相同。

证完。

命题9

…

若一个数是一个数的一部分，另一个数是另一个数的同样一部分，取更比例后，不管第一个数是第三个数怎样的一部分或几部分，第二个数也是第四个数的同样一部分或几部分。



设：数*A*是数*BC*的一部分，并且另一数*D*是另一数*EF*的一部分，与*A*是*BC*的一部分相同。

那么可以说：取更比例后，不管*A*是*D*怎样的一部分或几部分，*BC*也是*EF*同样的一部分或者几部分。

因为：不管*A*是*BC*怎样的一部分，*D*也是*EF*相同的一部分，

所以：在*BC*中有多少个等于*A*的数，在*EF*中就有多少个等于*D*的数。

设：分*BC*为等于*A*的数，即*BG*、*GC*；

分*EF*为等于*D*的数，即*EH*、*HF*，

所以：*BG*、*GC*的个数等于*EH*、*HF*的个数。

因为：数*BG*、*GC*彼此相等，数*EH*、*HF*也彼此相等，

那么：*BG*、*GC*的个数等于*EH*、*HF*的个数，

因此：不管*BG*是*EH*怎样的一部分或几部分，*GC*也是*HF*同样的一部分或几部分，

因此：不管*BG*是*EH*怎样的一部分或几部分，

那么：和*BC*也是和*EF*同样的一部分或几部分。[VII. 5，6]

又因：*BG*等于*A*，*EH*等于*D*，

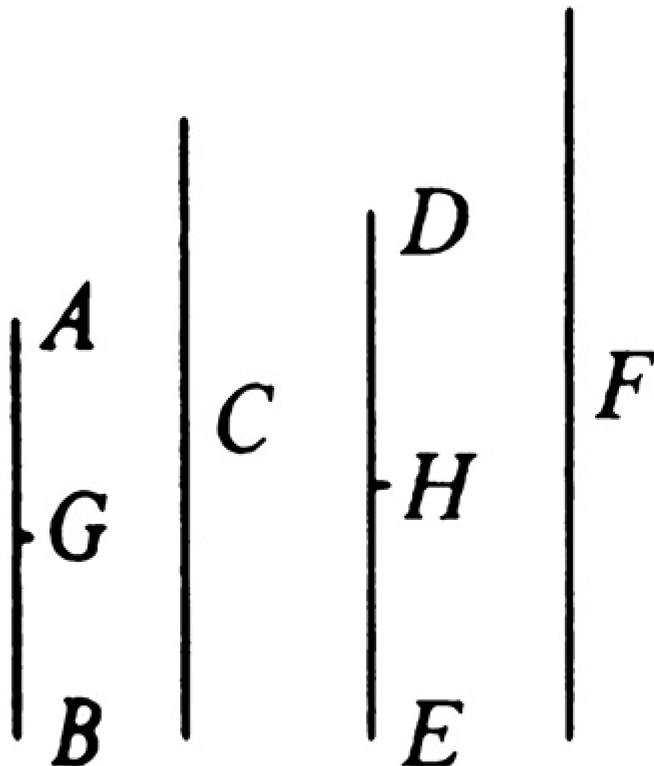
所以：不管*A*是*D*怎样的一部分或几部分，*BC*也是*EF*同样的一部分或几部分。

证完。

命题10

…

假如一个数是一个数的几部分，且另一个数是另一个数的同样几部分。那么取更比例后，不管第一个是第三个怎样的几部分或一部分，第二个也是第四个同样的几部分或一部分。



设：数AB是数C的几部分，

且另一数DE是另一数F同样的几部分。

那么可以说：取更比例，不管AB是DE怎样的几部分或一部分，那么C也是F同样的几部分或一部分。

因为：不管AB是C怎样的几部分，则DE也是F同样的几部分，

所以：在AB中有C的几个一部分，在DE中也有F的几个一部分。

将AB分为C的几个一部分，也就是AG、GB，

将DE分为F的几个一部分，也就是DH、HE，

那么：AG、GB的个数等于DH、HE的个数。

因为：不管AG是C怎样的一部分，

那么：*DH*也是*F*同样的一部分。

变更后：不管*AG*是*DH*怎样的一部分或几部分，*C*也是*F*同样的一部分或几部分。[VII. 9]

同理可得：不管*GB*是*HE*怎样的一部分或几部分，*C*也是*F*同样的一部分或几部分，

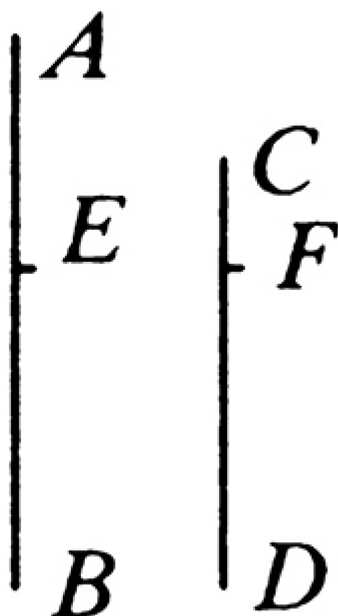
所以：不管*AB*是*DE*怎样的几部分或一部分，*C*也是*F*同样的几部分或一部分。[VII. 5，6]

证完。

命题11

…

假如整个数比整个数如同减数比减数，那么余数比余数也如同整个数比整个数。



设：整个数*AB*比整个数*CD*如同减数*AE*比减数*CF*。

那么可以说：余数*EB*比余数*FD*也如同整个数*AB*比整个数*CD*。

因为：*AB*比*CD*如同*AE*比*CF*，

所以：不管*AB*是*CD*怎样的一部分或几部分，*AE*也是*CF*同样的一部分或几部分。[VII. 定义20]

所以：余数*EB*是余数*FD*的一部分或几部分，也与*AB*是*CD*的一部分或几部分相同，[VII. 7，8]

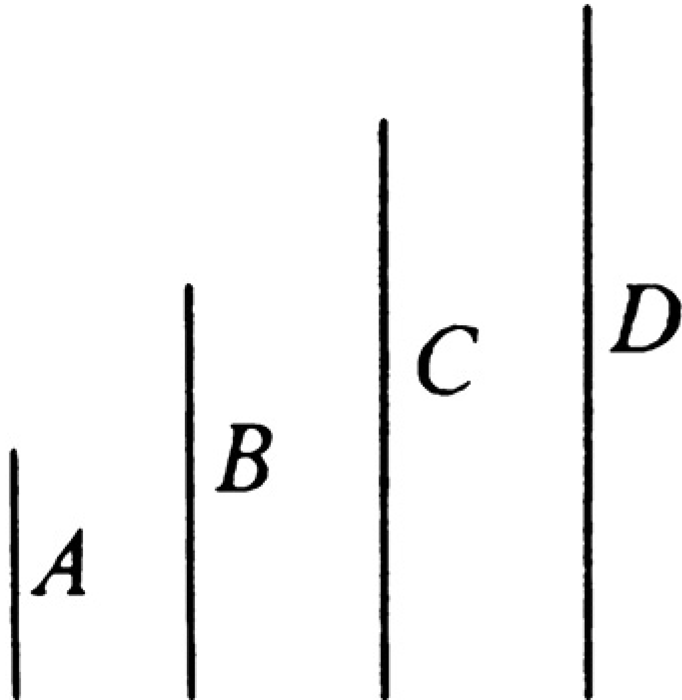
因此：*EB*比*FD*如同*AB*比*CD*。[VII. 定义20]

证完。

命题12

…

假如有成比例的任意多个数，那么前项之一比后项之一，又如同所有前项的和比所有后项的和。



设：有成比例的一些数A、B、C、D，其中A比B如同C比D。

那么可以说：A比B如同A、C的和比B、D的和。

因为：A比B如同C比D，

所以：不管A是B怎样的一部分或几部分，C也是D同样的一部分或几部分，[VII. 定义20]

所以：A、C之和是B、D之和的一部分或几部分，与A是B的一部分或几部分相同，[VII. 5，6]

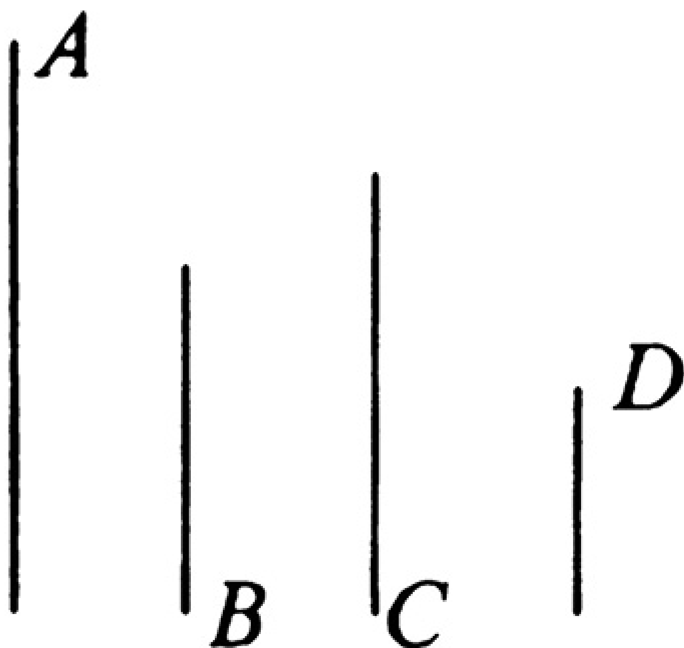
因此：A比B如同A、C之和比B、D之和。[VII. 定义20]

证完。

命题13

…

假如四个数成比例，那么它们的更比例也成立。



设：有四个成比例的数*A*、*B*、*C*、*D*，其中*A*比*B*如同*C*比*D*。

那么可以说：它们的更比例成立，

也就是*A*比*C*如同*B*比*D*。

因为：*A*比*B*如同*C*比*D*，

因此：不管*A*是*B*怎样的一部分或几部分，*C*也是*D*同样的一部分或几部分，[VII. 定义20]

所以，取更比例：不管*A*是*C*怎样的一部分或几部分，*B*也是*D*同样的一部分或几部分，[VII. 10]

因此：*A*比*C*如同*B*比*D*。[VII. 定义20]

证完。

命题14

…

假如有一些数，以及与它们个数相等的一些数，它们两两成相同的比，那么它们的首末比例也相同。

A　　　　D

B　　　　E

C　　　　F

假设：有一些数A、B、C和与它们个数相等的数D、E、F，且每组取两个作成相同的比，也就是，A比B如同D比E。

B比C如同E比F。

那么可以说：取首末比例，A比C如同D比F。

因为：A比B如同D比E，

所以，取更比例：A比D如同B比E。[VII. 13]

又因：B比C如同E比F，

所以，取更比例：B比E如同C比F。[VII. 13]

因为：B比E如同A比D，

所以：A比D如同C比F，

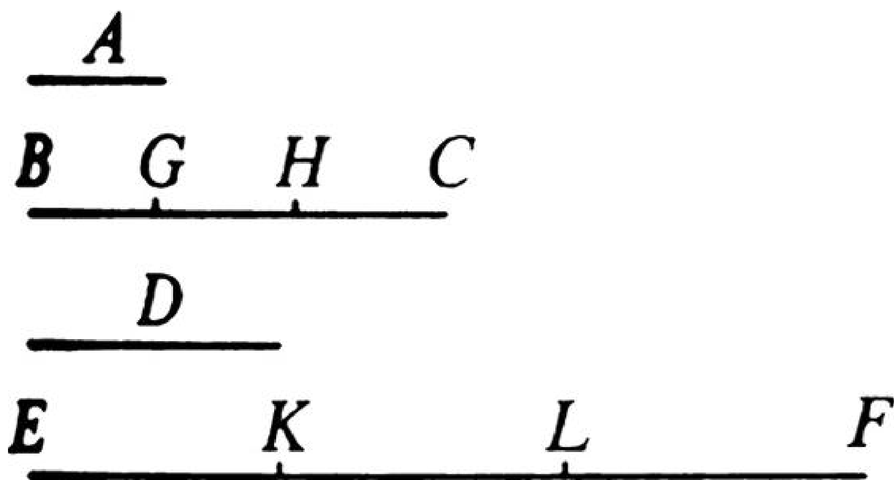
因此，取更比例：A比C如同D比F。[VII. 13]

证完。

命题15

…

假如一个单位量尽任一数与另一数的量尽另外一数的次数相同，那么取更比例后，单位量尽第三数与第二数量尽第四数有相同的次数。



设：单位*A*量尽一数*BC*与另一数*D*量尽另外一数*EF*的次数相同。

那么可以说：单位*A*量尽数*D*与*BC*量尽*EF*的次数相同。

因为：单位*A*量尽数*BC*与*D*量尽*EF*的次数相同，

所以：在*BC*中有多少个单位，在*EF*中也就有同样多少个等于*D*的数。

设：分*BC*为单位*BG*、*GH*、*HC*，又分*EF*为等于*D*的数*EK*、*KL*、*LF*。

那么：*BG*、*GH*、*HC*的个数等于*EK*、*KL*、*LF*的个数，

又因：各单位*BG*、*GH*、*HC*彼此相等，

各数*EK*、*KL*、*LK*彼此相等，

单位*BG*、*GH*、*HC*的个数等于数*EK*、*KL*、*LF*的个数。

所以：单位*BG*比数*EK*如同单位*GH*比数*KL*，

就如同单位*HC*比数*LF*，

因此：前项之一比后项之一等于所有前项和比所有后项和，[VII. 12]

所以：单位BG比数EK如同BC比EF。

又因：单位BG等于单位A，数EK等于D，

所以：单位A比数D如同BC比EF，

因此：单位A量尽D与BC量尽EF的次数相同。

证完。

命题16

…

假如二数彼此相乘得二数，那么所得二数彼此相等。

设：A、B是两数，A乘B得C且B乘A得D。

那么可以说：C等于D。

因为：A乘B得C，

所以：B依照A中的单位数量尽C。

又因：单位E量尽A，也是依照A中的单位数，

所以：用单位数E量尽A，与用数B量尽C的次数相同，

所以，取更比例：单位E量尽B与A量尽C的次数相同。[VII. 15]

因为：B乘A得D，

所以：依照B中的单位数，A量尽D。

又因：单位E量尽B也是依照B中的单位数，

所以：用单位E量尽数B与用A量尽D的次数相同。

又因：用单位E量尽数B与用A量尽C的次数相同，

所以：A量尽数C、D的每一个有相同的次数，

因此：C等于D。

证完。

命题17

…

假如一个数乘以两数得某两数，那么所得两数之比与被乘的两数之比相同。

A

B

C

D

E

F

设：数A乘两数B、C得D、E。

那么可以说：B比C如同D比E。

因为：A乘B得D，

所以：按照A中之单位数，B量尽D。

又因：单位F量尽数A也是按照A中的单位数，

所以：用单位F量尽数A与用B量尽D有相同的次数，

因此：单位F比数A如同B比D。[VII. 定义20]

同理可得：单位F比数A如同C比E，

所以：B比D如同C比E，

所以，取更比例：B比C如同D比E。[VII. 13]

证完。

命题18

…

假如两数各乘任一数得某两数，那么所得两数之比与两乘数之比相同。

A

B

C

D

E

假设：两数A、B乘任一数C得D、E。

那么可以说：A比B如同D比E。

因为：A乘C得D，

所以：C乘A得D。[VII. 16]

同理可得：C乘B得E，

所以：数C乘两数A、B得D、E，

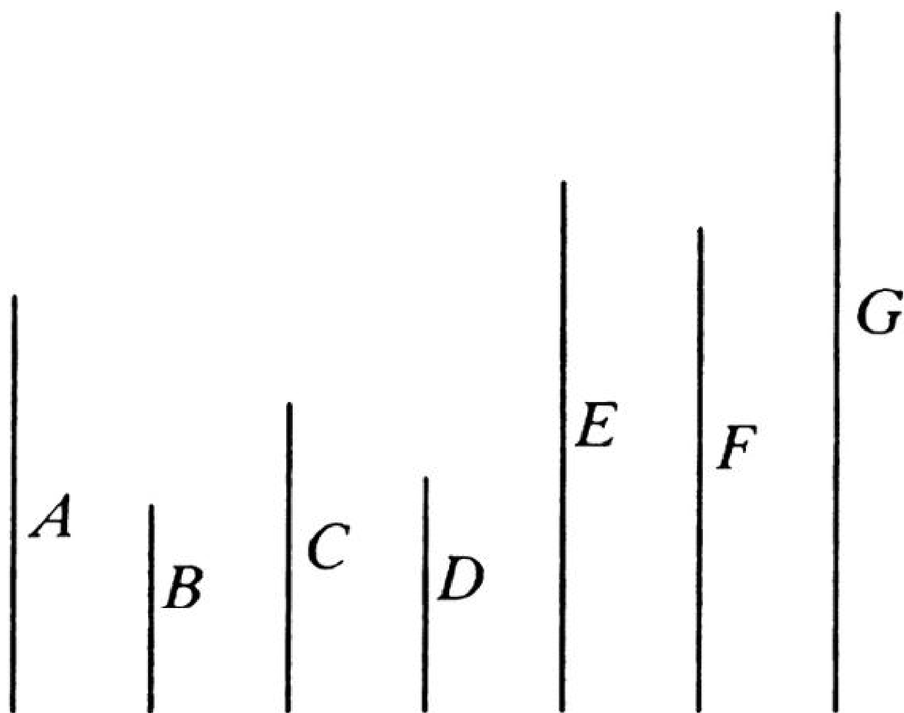
因此：A比B如同D比E。[VII. 17]

证完。

命题19

…

假如四个数成比例，那么第一个数和第四个数乘得的数，等于第二个数和第三个数乘得的数；假如第一个数和第四个数乘得的数，等于第二个数和第三个数乘得的数，那么这四个数成比例。



设：A、B、C、D四个数成比例，也就是A比B如同C比D，

且A乘D得E，B乘C得F。

那么可以说：E等于F。

先设：A乘C得G。

因为：A乘C得G，A乘D得E，

那么：数A乘两数C、D得G、E，

所以：C比D如同G比E。[VII. 17]

因为：C比D如同A比B，

所以：A比B如同G比E。

又因：A乘C得G，

还有B乘C等于F，

所以：两数A、B乘以一确定的数C得G、F，

因此：A比B如同G比F。[VII. 18]

因为：A比B如同G比E，

所以：G比E如同G比F，

所以：G与两数E、F的每一个有相同比，

因此：E等于F。[参看V. 9]

又设：令E等于F。

那么可以说：A比B如同C比D。

用上述的作图。

因为：E等于F，

所以：G比E如同G比F。[参看V. 7]

又因：G比E如同C比D，[VII. 17]

G比F如同A比B，[VII. 18]

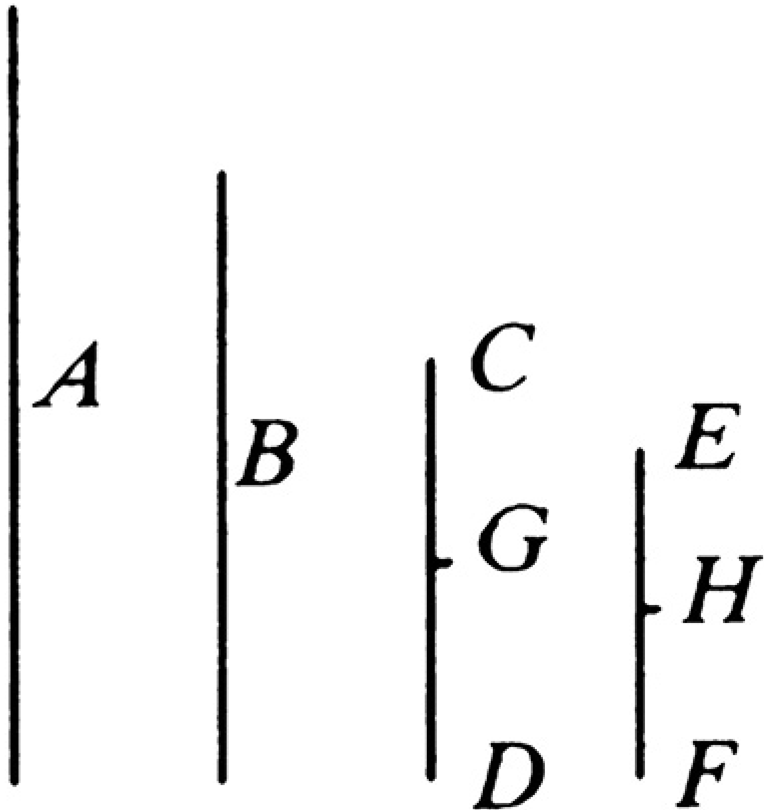
所以：A比B如同C比D。

证完。

命题20

…

用有相同比的数对中最小的一对数，分别量其他数对，那么大的量尽大的，小的量尽小的，并且所得的次数相同。



设：*CD*、*EF*是与*A*、*B*有相同比的数对中最小的一对数。

那么可以说：*CD*量尽*A*与*EF*量尽*B*有相同的次数。

此处*CD*不是*A*的几部分。

这是因为，若可能，这样假设：

*EF*是*B*的几部分与*CD*是*A*的几部分相同，[V11. 13和定义20]

所以：在*CD*中有*A*的多少个一部分，在*EF*中也有*B*的同样多少个一部分。

将*CD*分为*A*的一部分，也就是*CG*、*GD*。

将*EF*分为*B*的一部分，也就是*EH*、*HF*。

此时：*CG*、*GD*的个数等于*EH*、*HF*的个数。

因为：*CG*、*GD*彼此相等，*EH*、*HF*彼此相等，*CG*、*GD*的个数等于*EH*、*HF*的个数，

所以：*CG*比*EH*如同*GD*比*HF*，

因此：前项之一比后项之一如同所有前项之和比所有后项之和，[VII. 12]

故也有：*CG*比*EH*如同*CD*比*EF*，

因此：*CG*、*EH*与小于它们的数*CD*、*EF*有相同比。这是不符合实际的。

因为：由假设*CD*、*EF*是和它们有相同比中的最小两数，

所以：*CD*不是*A*的几部分，

因此：*CD*是*A*的一部分。[VII. 4]

又因：*EF*是*B*的一部分，与*CD*是*A*的一部分相同，[VII. 13和定义

20]

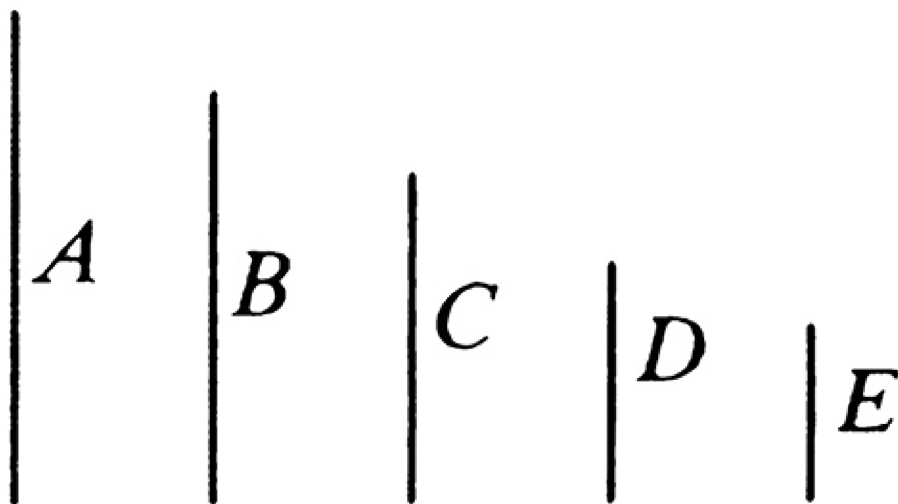
因此：CD量尽A与EF量尽B有相同的次数。

证完。

命题21

…

互素的两数是与它们有同比数对中最小的。



设：A、B是互素的数。

那么可以说：A、B是与它们有相同比的数对中最小的。

因为：若非如此，就会有与A、B同比的数小于A、B，并设它们是C、D，

此时，有相同比的最小一对数，分别量尽与它们有相同比的数对，所得的次数相同，

也就是前项量尽前项与后项量尽后项的次数相同，[VII. 20]

所以：C量尽A的次数与D量尽B的次数相同。

现在，C量尽A有多少次，就设在E中有多少单位，

所以：依照E中单位数，D也量尽B。

又因：依照E中单位数，C量尽A，

所以：依照C中单位数，E也量尽A。[VII. 16]

同理可得：依照D中单位数，E也量尽B，[VII. 16]

所以：E量尽互素的数A、B。

这并不符合实际。

所以：没有与A、B同比且小于A、B的数对，

因此：A、B是与它们有同比的数对中最小的一对。

证完。

命题22

…

有相同比的数对中的最小一数对是互素的。

A

B

C

D

E

设：A、B是与它们有同比的一些数对中最小的数对。

那么可以说：A、B互素。

因为：它们不互素，就有某个数能量尽它们。

设：能量尽它们的数是C。

且C量尽A有多少次，就设在D中有多少个单位，

C量尽B有多少次，就设在E中有多少个单位。

因为：依照D中单位数，C量尽A，

所以：C乘D得A。[VII. 定义15]

同理可得：C乘E得B，

所以：数C乘两数D、E各得出A、B，

所以：D比E如同A比B，[VII. 17]

因此：D、E与A、B有相同的比，并且小于它们。

这并不符合实际。

所以：没有一个数能量尽数A、B，

因此：A、B互素。

证完。

命题23

…

假如两数互素，那么能量尽其一的数必与另一数互素。



设：A、B是两互素的数，数C量尽A。

那么可以说：C、B也是互素的。

这是因为，若C、B不互素，那么：就有某个数量尽C、B。

设：量尽它们的数是D。

因为：D量尽C，并且C量尽A，

所以：D也量尽A。

又因：D也量尽B，

所以：D量尽互素的A、B。这是不符合实际的，[VII. 定义12]

因此：没有数能量尽数C、B，

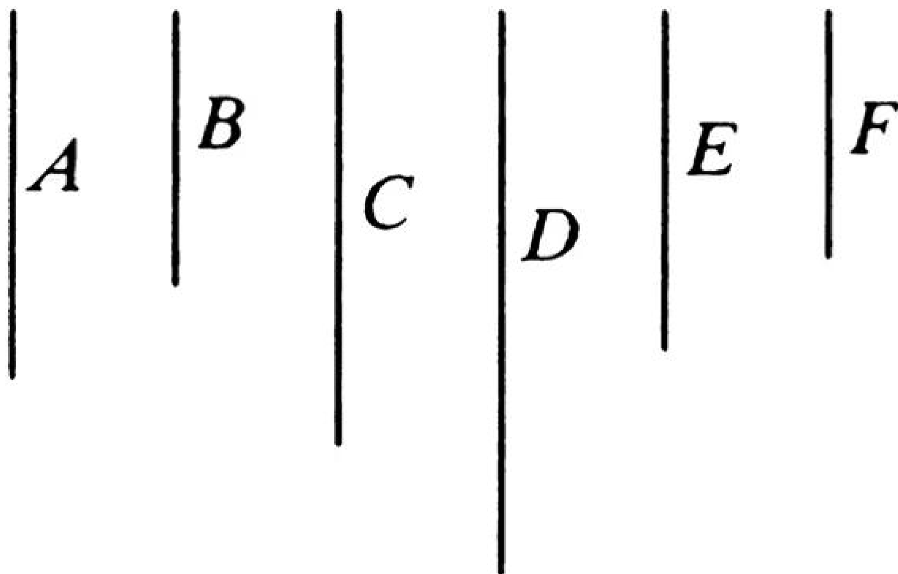
所以：C、B互素。

证完。

命题24

…

假如两数与某数互素，那么它们的乘积与该数也互素。



设：两数A、B与数C互素，A乘B得D。

那么可以说：C、D互素。

因为：如果C、D不互素，那么就有一个数将量尽C、D。

设：量尽它们的数是E。

因为：C、A互素，并确定了数E量尽C，

所以：A、E是互素的。[VII. 23]

此时，E量尽D有多少次，就设在F中有多少单位，

故：依照在E中有多少单位，F也量尽D，[VII. 16]

所以：E乘F得D。[VII. 定义15]

因为：A乘B也得D，

所以：E、F的乘积等于A、B的乘积。

又因：假如两外项之积等于内项之积，那么这四个数成比例，[VII. 19]

所以：E比A如同B比F。

又因：A、E互素，

且互素的两数也是与它们有同比的数对中的最小数对，[VII. 21]

因为：有相同比的一些数对中最小的一对数，其大小两数分别量尽具有同比的大小两数，

所以：所得的次数相同，也就是前项量尽前项和后项量尽后项，[VII. 20]

因此：E量尽B。

又因：E也量尽C，

所以：E量尽互素的二数B、C，这是不符合实际的，[VII. 定义12]

因此：没有数能量尽数C、D，

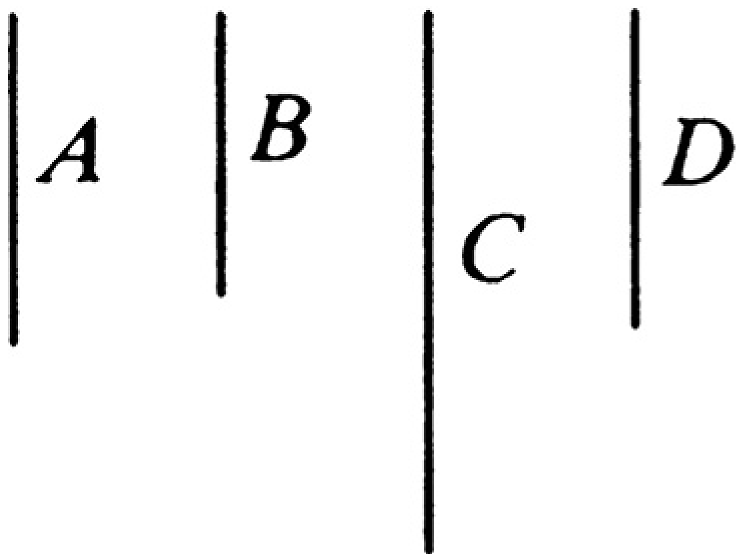
所以：C、D互素。

证完。

命题25

…

假如两数互素，那么其中之一的自乘积与另一个数互素。



设：A、B两数互素，且A自乘等于C。

那么可以说：B、C互素。

假如：取D等于A。

因为：A、B互素，A等于D，

所以：D、B也互素，

所以：两数D、A的每一个与B互素，

因此：D、A的乘积也与B互素。[VII. 24]

又因：D、A的乘积是C，

所以：C、B互素。

证完。

命题26

…

假如两数与另两数的每一个都互素，那么两数乘积与另两数的乘积也是互素的。

A

B

C

D

E

F

设：两数A、B与两数C、D的每一个都互素，且A乘B得E，C乘D得F。

那么可以说：E、F互素。

因为：数A、B的每一个与C互素，

所以：A、B的乘积也与C互素。[VII. 24]

又因：A、B的乘积是E，

所以：E、C互素。

同理可得：E、D也是互素的，

所以：数C、D的每一个与E互素，

因此：C、D的乘积也与E互素。[VII. 24]

又因：C、D的乘积是F，

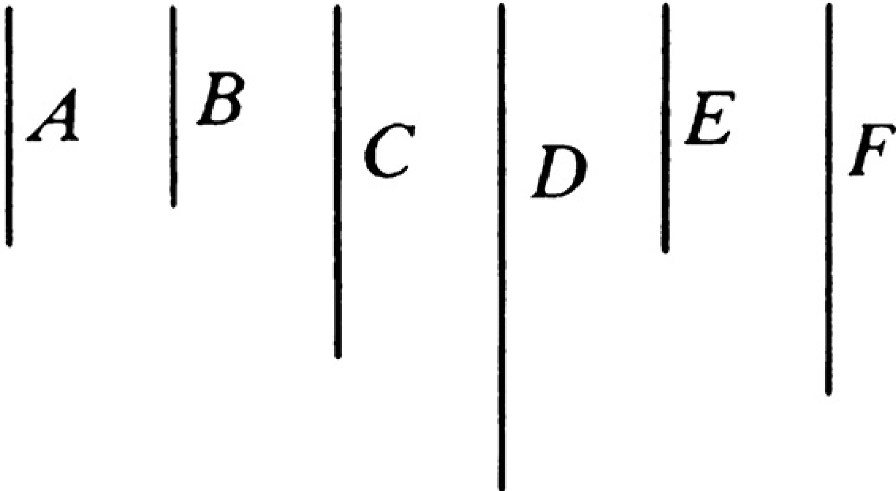
所以：E、F互素。

证完。

命题27

…

假如两数互素，每个自乘得一确定的数，那么这些乘积是互素的；用原数乘以乘积得某数，这最后乘积也是互素的[依此类推]。



设：A、B两数互素，

A自乘得C，且A乘C得D，

B自乘得E，且B乘E得F。

那么可以说：C与E互素，D与F互素。

因为：A、B互素，且A自乘得C，

所以：C、B互素。

因为：C、B互素，且B自乘得E，

所以：C、E互素。[VII. 25]

又因：A、B互素，B自乘得E，

所以：A、E互素。[VII. 25]

此时，两数A、C与两数B、E的每一个互素，

因此：A、C之积与B、E之积也互素。[VII. 26]

并且A、C的乘积是D，B、E的乘积是F，

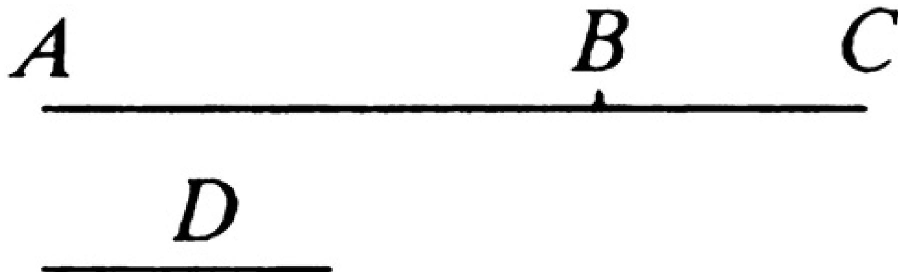
因此：D、F互素。

证完。

命题28

…

假如两数互素，那么其和与它们中的每一个也互素；假如两数之和与它们中的任一个互素，那么原二数也互素。



设：互素的两个数AB、BC相加。

那么可以说：它们的和AC与数AB、BC每一个都互素。

因为：倘若AC、AB不互素，那么就有某数量尽AC、AB，

设：量尽它们的数是D。

因为：D量尽AC、AB，

因此：它也量尽余数BC。

又因：它也量尽AB，

所以：D量尽互素的二数AB、BC，这是不符合实际的，[VII. 定义12]

所以：没有数量尽AC、AB，

因此：AC、AB互素。

同理可得：AC、BC也互素，

因此：AC与数AB、BC的每一个互素。

设：AC、AB互素，

那么可以说：AB、BC也互素。

因为：倘若AB、BC不互素，则有某数量尽AB、BC，

设：量尽它们的数是D。

因为：D量尽数AB、BC的每一个，

所以：它也能量尽整个数AC。

又因：它也能量尽AB，

所以：D量尽互素二数AC、AB，这是不符合实际的，[VII. 定义12]

所以：没有数可以量尽AB、BC，

因此：AB、BC互素。

证完。

命题29

…

任一素数与用它量不尽的任一数互素。

设：素数A量不尽B。

那么可以说：A、B互素。

因为：若A、B不互素，

那么：将有某数量尽它们。

设：C量尽它们。

因为：C量尽B，且因A量不尽B，

所以：C与A不相同。

又因：C量尽A、B，

所以：C也量尽与C不同的素数A，这是不符合实际的，

所以：没有数量尽A、B，

因此：A、B互素。

证完。

命题30

…

假如两数相乘得某数，且某一素数量尽该乘积，那么它也量尽原来两数之一。

A

B

C

D

E

设：两数A、B相乘得C，且素数D量尽C。

那么可以说：D量尽A、B之一。

设：D量不尽A。

因为：D是素数，

所以：A，D互素。[VII. 29]

因为：D量尽C有多少次数，就设在E中有同样多少个单位，

又因：依照E中单位的个数，D量尽C，

因此：D乘E得C。[VII. 定义15]

因为：A乘B也得C，

所以：D、E的乘积等于A、B的乘积，

所以：D比A如同B比E。[VII. 19]

因为：D、A互素，

且互素的二数是具有相同比的数对中最小的一对，[VII. 21]

又因：它的大小两数分别量尽具有同比的大小两数，所得的次数相同，也就是前项量尽前项和后项量尽后项，[VII. 20]

所以：D量尽B。

同理可证：假如D量不尽B，那么它将量尽A，

因此：D量尽A、B之一。

证完。

命题31

…

任一合数可被某素数量尽。

A

B

C

设：A是一个合数。

那么可以说：A可被某一素数量尽。

因为：A是合数，则有某数量尽它，

设：量尽它的数是B。

若B是素数，那么证明完毕。

若B是一个合数，那么将有某数量尽它。

设：量尽它的数是C。

因为：C量尽B，B又量尽A，

所以：C也量尽A。

若C是素数，那么证明完毕，

若C是合数，那么将有某个数量尽它。

用这种方式类推，就会找到某个素数量尽它前面的数，它也就量尽A。

因为：如果没有这个数，就会得出一个无穷数列中的数都量尽A，且其中每一个小于其前面的数，

这是不符合实际的。

所以：可以找出一个素数量尽它前面的数，也可以量尽A，

因此：任一合数可被某一素数量尽。

证完。

命题32

…

任一数要么是素数，要么可被某个素数量尽。

A

设：*A*是一个数。

那么可以说：*A*要么是素数，要么能够被某素数量尽。

若*A*是素数，那么证明完毕，

若*A*是合数，那么，一定有某个素数能量尽它。[VII. 31]

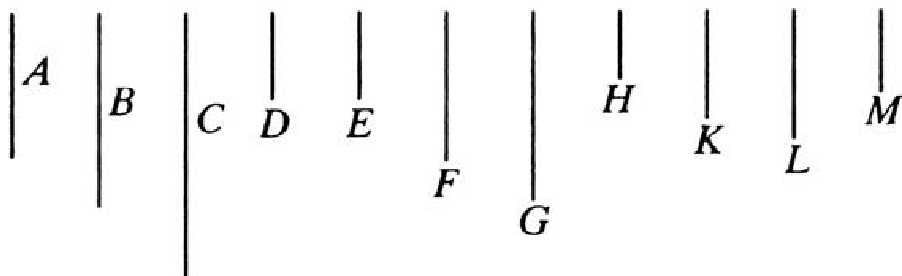
所以：任一数或是素数，或者可被某一素数量尽。

证完。

命题33

…

给定任意几个数，求与它们有同比的数组中最小数组。



设：已给定数*A*、*B*、*C*。

要求：找出与*A*、*B*、*C*有相同比的数组中最小数组。

A、*B*、*C*要么互素，要么不互素。

假如：*A*、*B*、*C*互素。

那么：它们是与它们有同比的数组中最小数组。[VII. 21]

假如：它们不互素。

设：D是所取A、B、C的最大公度数。[VII. 3]

因为：依照D分别量尽A、B、C各有多少次，就分别设在E、F、G中有同样多少个单位，

所以：按照D中的单位数，E、F、G分别量尽A、B、C，[VII. 16]

所以：E、F、G分别量尽A、B、C所得的次数相同，

因此：E、F、G与A、B、C有相同比。[VII. 定义20]

又可证：它们是具有这些比的最小数组。

假如：E、F、G不是与A、B、C有相同比的数组中最小数组。

那么：就有小于E、F、G且与A、B、C有相同比的数。

设：它们是H、K、L，

所以：H量尽A，与K、L分别量尽数B、C有相同的次数。

因为：H量尽A有多少次数，就设在M中有同样多少单位，

所以：依照M中的单位数，K、L分别量尽B、C。

因为：依照M中的单位数，H量尽A，

所以：依照H中的单位数，M也量尽A。[VII. 16]

同理可得：分别依照在数K、L中的单位数，M也量尽数B、C，

因此：M量尽A、B、C。

因为：依照M中的单位数，H量尽A，

所以：H乘M得A。[VII. 定义15]

同理可得：E乘D得A，

所以：E、D的乘积等于H、M之乘积，

因此：E比H如同M比D。[VII. 19]

因为：E大于H，

所以：M大于D。

又因：它量尽A、B、C，

且根据假设：D是A、B、C的最大公度数，

这是不符合实际的，

所以：没有任何小于E、F、G且与A、B、C同比的数组，

因此：E、F、G是与A、B、C有相同比的数组中最小数组。

证完。

命题34

…

给定两数，求它们能量尽的数中的最小数。

A

B

C

D

E

F

设：A、B是两给定的数。

要求：找出它们能量尽的数中的最小数。

A、B要么互素，要么不互素。

先设：A、B互素，A乘B得C，

因此：B乘A也得C，[VII. 16]

所以：A、B量尽C。

现在可以证明它是被A、B量尽的最小数。

因为：若不是，A、B将量尽比C小的数，

设：它们量尽D，

所以：不管A量尽D有多少次数，就设E中有同样多少单位。

不论B量尽D有多少次数，就设F中有同样多少单位，

因此：A乘E得D，B乘F得D，[VII. 定义15]

因此：A、E的乘积等于B、F的乘积。

所以：A比B如同F比E。[VII. 19]

又因：A、B互素，

所以：F、E也是同比数中的最小数对，[VII. 21]

因为：最小数对的大小两数分别量尽具有同比的大小两数，所得的次数相同，[VII. 20]

所以：后项B量尽后项E。

又因：A乘B、E分别是C、D，

所以：B比E如同C比D。[VII. 17]

因为：B量尽E，

所以：C也量尽D，也就是大数量尽小数。这是不符合实际的，

因此：A、B不能量尽小于C的任一数，

所以：C是被A、B量尽的最小数。

设：A、B不互素，

且F、E为与A、B同比的数对中的最小数对，[VII. 33]

所以：A、E的乘积等于B、F的乘积。[VII. 19]

又设：A乘E得C，

因此：B乘F得C，

所以：A、B量尽C，

那么也可以证明，它是被A、B量尽的数中的最小数。

因为：倘若不是，A、B将量尽小于C的数，

设：它们量尽D。

因为：依照A量尽D有多少次数，就设G中有同样多少单位，

依照B量尽D有多少次数，就设H中有同样多少单位，

所以：A乘G得D，B乘H得D，

所以：A、G的乘积等于B、H的乘积，

因此：A比B如同H比G。[VII. 19]

又因：A比B如同F比E，

所以：F比E如同H比G。

因为：F、E是最小的，而最小数对的大小两数分别量尽有同比的大小两数，所得次数相同，[VII. 20]

所以：E量尽G。

又因：A乘E、G各得C、D，

所以：*E*比*G*如同*C*比*D*。[VII. 17]

又因：*E*量尽*G*，

所以：*C*也量尽*D*，也就是较大数量尽较小数，

这不符合实际，

因此：*A*、*B*量不尽任何小于*C*的数，

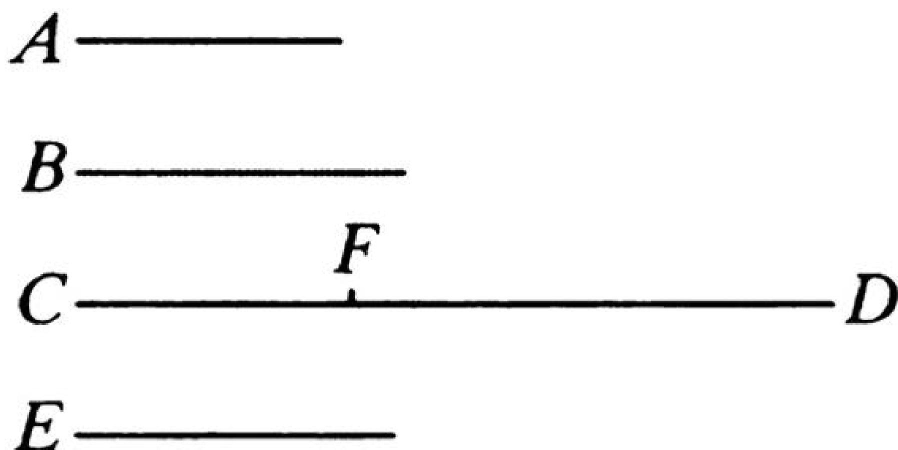
所以：*C*是被*A*、*B*量尽数中的最小数。

证完。

命题35

…

假如两数量尽某数，那么被它们量尽的最小数也量尽这个数。



设：两数*A*、*B*量尽一数*CD*，且*E*是它们量尽的最小数。

那么可以说：*E*也量尽*CD*。

假如：*E*量不尽*CD*，设*E*量出*DF*，余数*CF*小于*E*。

因为：*A*、*B*量尽*E*，*E*量尽*DF*，

所以：A、B也量尽DF。

又因：它们也量尽整个CD，

所以：它们也量尽小于E的余数CF。

这不符合实际。

因此：E不可能量不尽CD，

所以：E量尽CD。

证完。

命题36

…

给定三个数，求被它们量尽的最小数。

A——————

B————————

C——————————

D——————————————

E——————————————

A

B

C

D

E

F

设：已给定三个数A、B、C，

要求：求它们量尽的最小数。

设：二数A、B量尽的最小数为D。[VII. 34]

那么：C要么量尽D，要么量不尽D。

设：C量尽D。

因为：A、B量尽D，

所以：A、B、C量尽D。

可以证明，D是被它们量尽的最小数。

因为：若非如此，A、B、C量尽小于D的某数，

设：它们量尽E。

因为：A、B、C量尽E，

因此：A、B量尽E，

所以：被A、B量尽的最小数也量尽E。[VII. 35]

又因：D是被A、B量尽的最小数，

所以：D量尽E。

较大数量尽较小数，这并不符合实际。

所以：A、B、C不能量尽小于D的数，

因此：D是A、B、C量尽的最小数。

设：C量不尽D，并取E为被C、D量尽的最小数。[VII. 34]

因为：A、B量尽D，并且D量尽E，

所以：A、B也量尽E。

又因：C也量尽E，

所以：A、B、C也量尽E。

可以证明，E是它们量尽的最小数。

若不然，设：A、B、C量尽小于E的某数，且它们量尽F。

因为：A、B、C量尽F，

所以：A、B也量尽F，

因此：被A、B量尽的最小数也量尽F。[VII. 35]

又因：D是被A、B量尽的最小数，

所以：D量尽F。

又因：C也量尽F，

所以：D、C量尽F。

所以：被D、C量尽的最小数也量尽F。

因为：E是被C、D量尽的最小数，

所以：E量尽F。

较大数量尽较小数，这是不符合实际的。

因此：A、B、C量不尽任一小于E的数，

所以：E是被A、B、C量尽的最小数。

证完。

命题37

…

假如一个数被某数量尽，那么被量数有一个称为与量数的一部分同名的一部分。

A

B

C

D

设：数A被某数B量尽。

那么可以说：A有一个称为与B的一部分同名的一部分。

因为：依照B量尽A有多少次数，就设C中有多少个单位，

又因：依照C中的单位数，B量尽A，

并且依照C中单位数，单位D量尽数C，

所以：单位D量尽数C与B量尽A有相同的次数。

那么，取更比例：单位D量尽数B与C量尽A有相同的次数，[VII. 15]

所以：不管单位D是B怎样的一部分，C也是A同样的一部分。

又因：单位D是数B的被称为B的一部分同名的一部分，

所以：C也是A的被称为B的一部分同名的一部分，

也就是，A有一个被称为B的一部分同名的一部分C。

证完。

命题38

…

假如一个数有任意一部分，那么它将被与该部分同名的一个数量尽。

A

B

C

D

设：数A有一个一部分B，且C是与一部分B同名的一个数。

那么可以说：C量尽A。

因为：B是A的被称为与C同名的一部分，

且单位D也是C的被称为与C同名的一部分，

因此：不管单位D是数C怎样的一部分，B也是A同样的一部分，

因此：单位D量尽C与B量尽A有相同的次数，

那么，取更比例：单位D量尽B与C量尽A有相同的次数，[VII. 15]

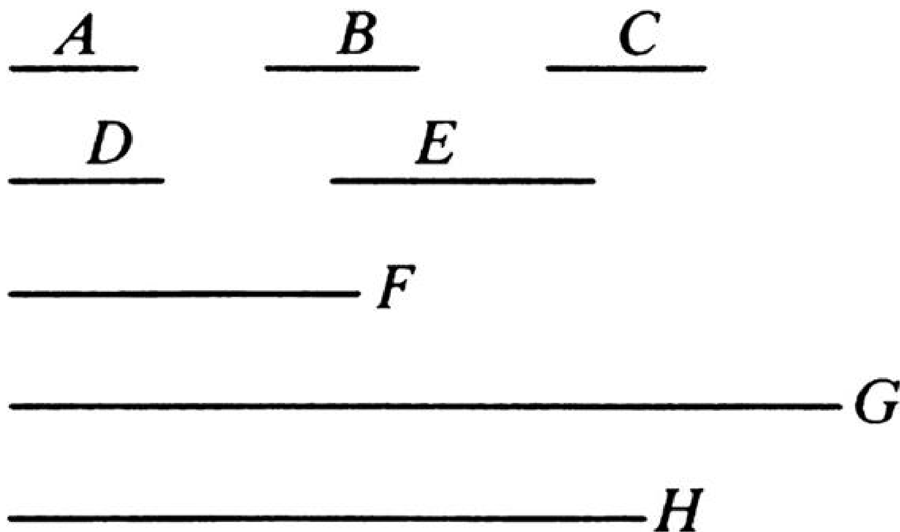
因此：C量尽A。

证完。

命题39

…

求有给定的几个一部分的最小数。



设：*A*、*B*、*C*是已给定的几个一部分。

要求：求出有几个一部分*A*、*B*、*C*的最小数。

设：*D*、*E*、*F*是被称为与几个一部分*A*、*B*、*C*同名的数。并且取*G*是被*D*、*E*、*F*量尽的最小数。[VII. 36]

所以：*G*有被称为与*D*、*E*、*F*同名的几个一部分。[VII. 37]

因为：*A*、*B*、*C*是被称为与*D*、*E*、*F*同名的几个一部分，

所以：*G*有几个一部分*A*、*B*、*C*，

那么，可以证明：*G*也是含这几个一部分*A*、*B*、*C*的最小数。

假如：并非如此，将有某数*H*有这几个一部分*A*、*B*、*C*，且小于*G*。

因为：H有着这几个一部分A、B、C，

所以：H将被称为与这几个一个部分A、B、C同名的数所量尽。[VII. 38]

又因：D、E、F是被称为与这几个一部分A、B、C同名的数，

因此：D、E、F量尽H，

所以：H小于G，

这是不符合实际的，

因此：没有一个数有这几个一部分A、B、C且小于G。

证完。

巻VIII

命题

命题1

…

假如有任意几个数成连比例，并且它们的两外项互素，那么这些数是与它们有相同比的数组中最小的。

设：数A、B、C、D成连比例，且它们的两外项A、D互素。

那么可以说：A、B、C、D是与它们有相同比的数组中最小的数组。

若不然，就设：E、F、G、H分别小于A、B、C、D，并且与它们有同比。

因为：A、B、C、D与E、F、G、H有相同比，并且A、B、C、D的个数与E、F、G、H的个数相等，

那么，取首末比：

A比D如同E比H。[VII. 14]

又因：A、D互素，

那么：互素的两数也是与它们有相同比的数对中最小的，[VII. 21]

并有相同比的数中最小一对数分别量其他的数对，大的量大的，小的量小的，并有相同次数。也就是前项量前项，后项量后项，量得的次数相同，[VII. 20]

因此：A量尽E。

较大的量尽较小的，这是不符合实际的。

因此：小于A、B、C、D的E、F、G、H与它们没有相同的比，

所以：A、B、C、D是与它们有相同比的最小数组。

证完。

命题2

…

按照预定的个数，求已知比的成连比例中的最小数组。

A　C

B　D

E

F

G

H

K

设：有已知比的最小数对A、B，

要求：按预定个数求出成连比例的最小数组，让它们的比与A、B的比相同。

设：预定个数为4，

且A自乘得C，A乘以B得D，B自乘得E。

又设：A乘C、D、E分别得F、G、H，且B乘E得K。

因为：A自乘得C，且A乘B得D，

所以：A比B如同C比D。[VII. 17]

又因：A乘B得D，而B自乘得E，

所以：数A、B乘B分别得D、E，

因此：A比B如同D比E。[VII. 18]

又因：A比B如同C比D，

所以：C比D如同D比E。

因为：A乘C、D得F、G，

所以：C比D如同F比G。[VII. 17]

又因：C比D如同A比B，

所以：A比B如同F比G。

因为：A乘D、E得G、H，

所以：D比E如同G比H。[VII. 17]

又因：D比E如同A比B，

所以：A比B如同G比H。

因为：A、B乘E得H、K，

所以：A比B如同H比K。[VII. 18]

又因：A比B如同F比G，及G比H，

所以：F比G如同G比H，以及H比K，

因此：C、D、E以及F、G、H、K皆成连比例，而比为A比B。

接下来，可以证明：它们是成已知比的最小者。

因为：A、B是与它们有相同比的最小者，并且有相同比的最小数是互素的，[VII. 22]

所以：A、B是互素的。

因为：数A、B分别自乘得C、E，A、B分别乘C、E得F、K，

所以：C、E和F、K分别互素。[VII. 27]

又因：若有许多成连比例的数，且它们的两外项互素，那么这些数是与它们有相同比的数组中最小的数组，[VIII. 1]

所以：C、D、E以及F、G、H、K是与A、B有相同比数组中最小的数组。

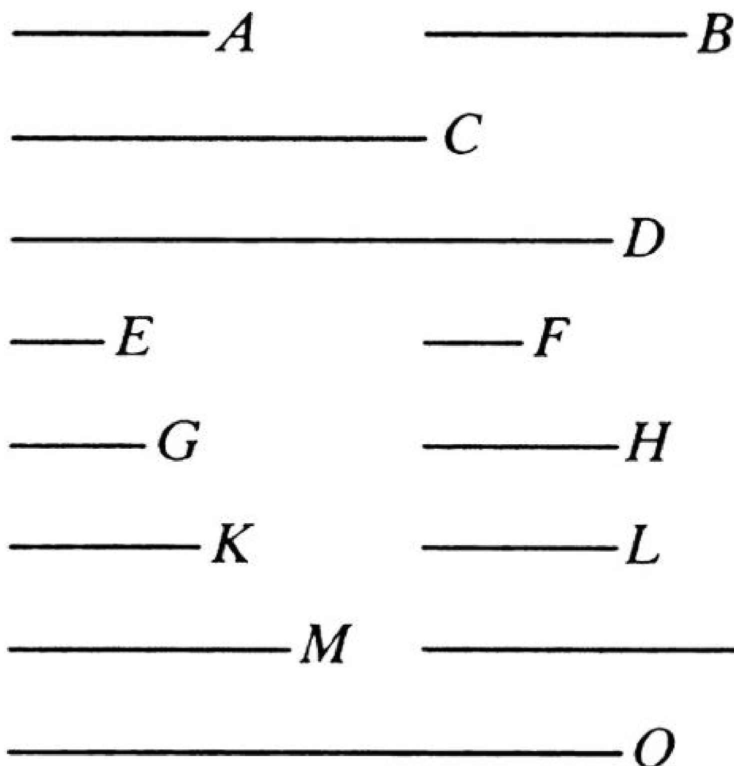
证完。

推论　假如成连比的三个数是与它们有相同比的最小者，那么它们的两外项是平方数；假如成连比的四个数是与它们有相同比的最小者，那么它们的两外项是立方数。

命题3

…

假如成连比例的几个数是与它们有相同比的数中的最小的，那么它们的两外项互素。



设：A、B、C、D是成连比例的几个数，并且是与它们有同比的数组中最小的。

那么可以说：它们的两外项A、D互素。

设：取数E、F是与A、B、C、D有相同比的数组中的最小数组。[VII. 33]

取有相同性质的另三个数G、H、K；

剩下的逐次多一个，以此类推。[VIII. 2]

直到个数等于数A、B、C、D的个数。

设：所取的数为L、M、N、O。

因为：E、F是与它们有相同比中的最小者，

所以：它们互素。[VII. 22]

又因：数E、F分别自乘得数G、K，

并且E、F分别乘以G、K得数L、O，[VIII. 2，推论]

所以：G、K和L、O分别互素。

因为：A、B、C、D是与它们有相同比的数组中最小者，

并且L、M、N、O是与A、B、C、D有相同比的数组中的最小者，

且数A、B、C、D的个数等于数L、M、N、O的个数，

所以：数A、B、C、D分别等于L、M、N、O，

因此：A等于L，D等于O。

又因：L、O是互素的，

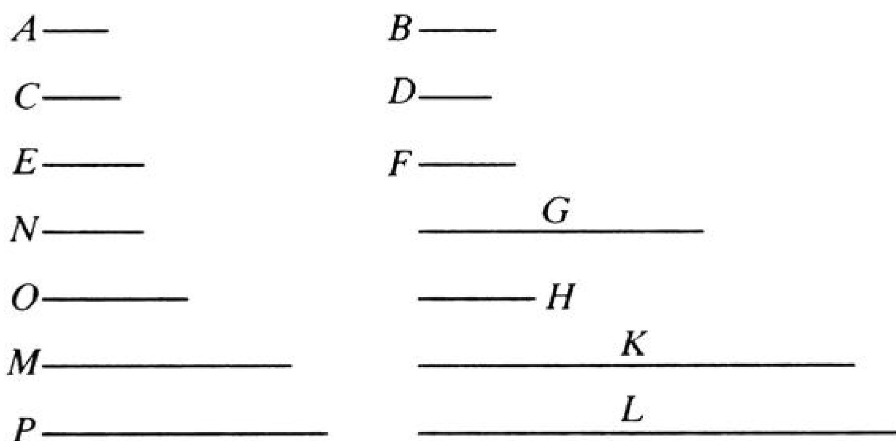
所以：A、D也是互素的。

证完。

命题4

…

已知由最小数给出的多个比，求连比例的几个数，它们是已知比的数中的最小数组。



设：由最小数给出的几个比是A比B，C比D和E比F。

要求：求连比例的最小数组，让它们的比是A比B，C比D及E比F。

设：G是被B、C量尽的最小数。[VII. 34]

且B量尽G有多少次，就设A量尽H有多少次；

C量尽G有多少次，就设D量尽K有多少次。

E要么量尽K，要么量不尽K。

先设：E量尽K。

且E量尽K有多少次，就设F量尽L也有多少次。

因为：A量尽H与B量尽G的次数相同，

所以：A比B如同H比G。[VII. 定义20，VII. 13]

同理可得：C比D如同G比K，以及E比F如同K比L，

所以：H、G、K、L是依A比B，C比D及E比F为连比例的数组。

其次，可以证明：它们也是有这个性质的最小数组。

假如：H、G、K、L只是依A比B，C比D和E比F为连比例的但不是最小数组，

就可设：最小数组是N、O、M、P。

A C

B D

E G

F H

K

Q

M

O

N

P

R

S

T

因为：A比B如同N比O，而A、B是最小的，

并且，有相同比的一对最小数分别量尽其他数对，大的量尽大的，小的量尽小的，且有相同的次数，也就是前项量尽前项与后项量尽后项的次数相同，

所以：B量尽Q。[VII. 20]

同理可得：C也量尽O，

所以：B、C量尽O，

因此：被B、C量尽的最小数也量尽O。[VII. 35]

因为：G是被B、C量尽的最小数，

所以：G量尽O，较大数量尽较小数。

这是不符合实际的。

因此：没有比H、G、K、L还小的数组的连比例能依照A比B，C比D，E比F。

又可设：E量不尽K。

设：M是被E、K量尽的最小数。

且K量尽M有多少次，就设H、G分别量N、O有多少次。

E量尽M有多少次，就设F量尽P也有多少次。

因为：H量尽N与G量尽O有相同的次数，

所以：H比G如同N比O。[VII. 13和定义20]

又因：H比G如同A比B，

所以：A比B如同N比O。

同理可证：C比D如同O比M。

因为：E量尽M与F量尽P有相同的次数，

所以：E比F如同M比P，[VII. 13和定义20]

所以：N、O、M、P是依照A比B，C比D和E比F为连比例。

其次，可以证明：它们也是依照A比B，C比D以及E比F为连比例的最小数组。

因为：假若不是这样，就会有某些数小于N、O、M、P而依照A比B，C比D以及E比F成连比例。

设：它们是Q、R、S、T。

因为：Q比R如同A比B，

又因：A、B是最小的，

并有相同比的一对最小数，分别量其他数对，大的量尽大的，小的量尽小的，量得的次数相同，也就是前项量尽前项与后项量尽后项的次数相同。[VII. 20]

所以：B量尽R。

同理：C也量尽R，

所以：B、C量尽R。

因此：被B、C量尽的最小数也量尽R。[VII. 35]

因为：G是被B、C量尽的最小数，

所以：G量尽R。

因为：G比R如同K比S，

所以：K也量尽S。[VII. 13]

因为：E也量尽S，

所以：E、K量尽S。

所以：被E、K量尽的最小数也量尽S。[VII. 35]

又因：M是被E、K量尽的最小数，

所以：M量尽S。

较大数量尽较小数，这是不符合实际的。

因为：没有小于N、O、M、P，依照A比B，C比D和E比F成连比例的一些数，

因此：N、O、M、P是依照A比B，C比D以及E比F成连比例的最小数组。

证完。

命题5

…

面数互比是其边之比的复比。

A

B

C　　D

E　　F

G

H

K

L

设：A、B是面数，数C、D是A的边，数E、F是B的边。

那么可以说：A与B的比是它们边比的复比。

因为：已知C比E和D比F，

那么，设：取依照C比E和D比F成连比例的最小数为G、H、K，

也就是：C比E如同G比H，

D比F如同H比K。[VIII. 4]

又设：D乘E得L。

因为：D乘C得A，D乘E得L，

所以：C比E如同A比L。[VII. 17]

又因：C比E如同G比H，

所以：G比H如同A比L。

因为：E乘D得L，E乘F得B，

所以：D比F如同L比B。[VII. 17]

又因：D比F如同H比K，

所以：H比K如同L比B。

但已经证明：G比H如同A比L，

那么，取首末比：G比K如同A比B。[VII. 14]

又因：G与K之比是这些边比的复比，

所以：A与B之比也是这些边比的复比。

证完。

命题6

…

假如有几个成连比例的数，并且第一个数量不尽第二个数，那么任一其他数也量不尽任一其他数。

设：A、B、C、D、E是成连比例的数，且A量不尽B。

那么可以说：任何一个数都量不尽其他任何一个数。

因为：A量不尽B，

所以：A、B、C、D、E依次互相量不尽，

由此可证明，任何一个数量不尽其他任何一个数。

如果可能，设：A量尽C。

那么：不管有几个数A、B、C，就取多少个数F、G、H，且设它们是与A、B、C有相同比中的最小数组。[VII. 33]

因为：F、G、H与A、B、C有相同比，并且数A、B、C的个数等于F、G、H的个数，

那么，取首末比：A比C如同F比H。[VII. 14]

又因：A比B如同F比G，

且A量不尽B，

所以：F也量不尽G。[VII. 定义20]

又因：单位能量尽任何数，

所以：F不是一个单位。

已知，F、H是互素的，[VIII. 3]

且F比H如同A比C，

所以：A也量不尽C。

同理可证：任何一个数量不尽其他任何一个数。

证完。

命题7

…

假如有多个成连比例的数，第一个数量尽最后一个数，那么第一个数也量尽第二个数。

A

B

C

D

设：数A、B、C、D成连比例，A量尽D。

那么可以说：A也量尽B。

假如：A量不尽B，

那么：这些数中任何一个数量不尽其他任何一个数。[VIII. 6]

又因：A量尽D，

因此：A也量尽B。

证完。

命题8

…

假如在两数之间有几个与它们成连比例的数，那么无论在它们之间有多少个成连比例的数，在与原来两数有相同比的两数之间就有多少个成连比例的数。

A E

C M

D N

B F

G K

H L

设：在两数A、B之间有数C、D，与它们成连比例。而E比F如同A比B。

那么可以说：在A、B间插入多少个成比例的数，也就在E、F之间能插入同样多少个成连比例的数。

因为：有多少个数A、B、C、D，就取多少个数G、H、K、L，让它们为与A、C、D、B有相同比的数中最小数组，[VII. 33]

所以：它们的两端G、L是互素的。[VIII. 3]

因为：A、C、D、B与G、H、K、L有相同比，且数A、C、D、B的个数等于数G、H、K、L的个数，

那么，取首末比：A比B如同G比L。[VII. 14]

又因：A比B如同E比F，

所以：G比L如同E比F。

因为：G、L互素，互素的数则是同比中最小者，[VII. 21]

并且有相同比的数中最小一对，分别量其他各数对，大的量尽大的，小的量尽小的，并有相同的次数，

也就是前项量尽前项与后项量尽后项的次数相同，[VII. 20]

因此：G量尽E与L量尽F的次数相同。

接下来，G量尽E有多少次，就设H、K分别量尽M、N也有多少次，

所以：G、H、K、L量尽E、M、N、F有同样多的次数。

因此：G、H、K、L与E、M、N、F有相同的比。[VII. 定义20]

又因：G、H、K、L与A、C、D、B有相同的比，

所以：A、C、D、B也与E、M、N、F有相同的比。

又因：A、C、D、B成连比例，

所以：E、M、N、F也成连比例。

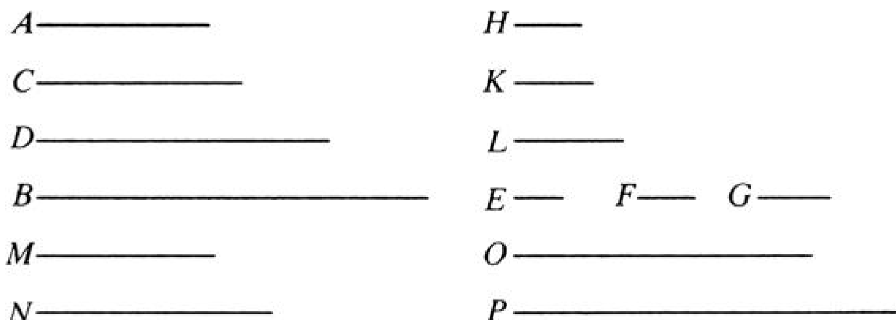
因此：在A、B之间插入多少个与它们成连比例的数，那么，也在E、F之间插入多少成连比例的数。

证完。

命题9

…

假如两数互素，插在它们之间的一些数成连比例，那么不管这样的一些成连比例的数有多少个，在互素两数的每一个数和单位之间同样有多少个成连比例的数。



设：C、D是插在互素的两数A、B之间的成连比例的数，又设单位为E。

那么可以说：A、B之间成连比例的数有多少个，在数A、B的每一个与单位E之间成连比例的数就有同样多少个。

设：两数F、G是与A、C、D、B有相同比中的最小者。取有同样性质的三个数H、K、L。

依次类推，直至它们的个数等于A、C、D、B的个数。[VIII. 2]

设：已求得的是M、N、O、P。

F自乘得H，且F乘H得M，且G自乘得L，而G乘L得P。[VIII. 2，推论]

因为：M、N、O、P是与F、G有相同比中的最小者，

又，A、C、D、B也是与F、G有相同比的最小者，[VIII. 1]

那么：数M、N、O、P的个数等于数A、C、D、B的个数，

所以：M、N、O、P分别等于A、C、D、B的个数，

因此：M等于A，而P等于B。

因为：F自乘得H，

所以：依照F中的单位数，F量尽H。

又因：依照F中的单位数，单位E量尽F，

所以：单位E量尽数F与F量尽数H的次数相同，

因此：单位E比数F，又如同F比H。[VII. 定义20]

因为：F乘H得M，

所以：依照F中的单位个数，H量尽M。

又因：依照F中的单位个数，单位E也量尽数F，

所以：单位E比数F如同H比M。

又因，已证明：单位E比数F如同F比H，

所以：单位E比数F如同F比H，又如同H比M。

因为：M等于A，

所以：单位E比数F如同F比H，又如同H比A。

同理可得：单位E比数G如同G比L，也如同L比B，

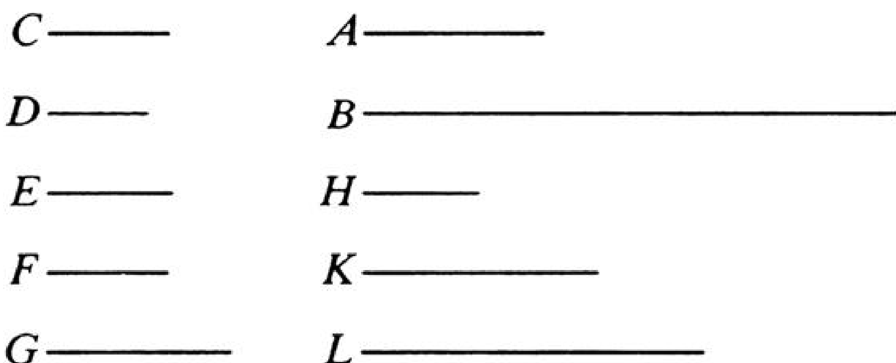
因此：插在A、B之间有多少个成连比例的数，那么插在A、B每一个与单位E之间成连比例的数也有同样多少个。

证完。

命题10

…

若插在两数中的每一个与一个单位之间的一些数成连比例，那么无论插在两个数中的每一个与单位之间成连比例的数有多少个，这两数之间就有同样多少个数成连比例。



设：D、E和F、G分别是插在A、B两数中与单位C之间的成连比例的数。

那么可以说：在数A、B中的每一个与单位C之间有多少成连比例的数，那么在A、B之间就有多少个成连比例的数。

设：D乘F得H，且D乘H得K，且F乘H得L。

因为：单位C比数D如同D比E，

所以：单位C量尽数D与D量尽E有相同的次数。[VII. 定义20]

又因：依照D中的单位数，C量尽D，

所以：依照D中的单位数，数D也量尽E，

因此：D自乘得E。

因为：C比数D如同E比A，

所以：单位C量尽数D与E量尽A的次数相同。

又因：依照D中的单位数，单位C量尽数D，

所以：依照D中的单位数，E也量尽A，

因此：D乘E得A。

同理可得：F自乘得G，且F乘G得B。

因为：D自乘得E，且D乘F得H，

所以：D比F如同E比H。[VII. 17]

同理可得：D比F如同H比G，[VII. 18]

因此：E比H如同H比G。

因为：D乘数E、H分别得A、K，

所以：E比H如同A比K。[VII. 17]

又因：E比H如同D比F，

所以：D比F如同A比K。

又因：数D、F乘H分别得K、L，

所以：D比F如同K比L。[VII. 18]

因为：D比F如同A比K，

所以：A比K如同K比L。

因为：F乘数H、G分别得L、B，

所以：H比G如同L比B。[VII. 17]

又因：H比G如同D比F，

所以：D比F如同L比B。

又因，已证明：D比F如同A比K，也如同K比L，

所以：A比K如同K比L，也如同L比B，

所以：A、K、L、B成连比例，

因此：插在A、B中的每一个与单位C之间有多少个成连比例的数，那么在A、B之间也有多少个成连比例的数。

证完。

命题11

…

在两个平方数之间有一个比例中项数，并且两平方数之比如同其边与边的二次比。

A

B

C

D

E

设：在两平方数A、B中，C是A的边，而D是B的边。

那么可以说：在A、B之间有一个比例中项数，且A比B如同C比D的二次比。

设：C乘D得E。

因为：A是平方数，C是A的边，

所以：C自乘得A。

同理可得：D自乘得B。

因为：C乘数C、D分别得A、E，

所以：C比D如同A比E。[VII. 17]

同理可得：C比D如同E比B，[VII. 18]

所以：A比E如同E比B。

因此：A、B之间有一个比例中项数，

那么，可以证明：A比B如同C与D的二次比。

因为：A、E、B是三个成比例的数，

所以：A比B如同A与E的二次比。[V. 定义9]

又因：A比E如同C比D，

所以：A比B如同C与D的二次比。

证完。

命题12

…

在两个立方数之间有两个比例中项数，并且两立方数之比如同其边与边的三次比。

A

B

C　　E

D　　F

H　　G

K

设：在两立方数A、B中，C是A的边，且D是B的边。

那么可以说：在A、B之间有两个比例中项数，A与B的比如同C与D的三次比。

设：C自乘得E，且C乘D得F。

D自乘得G，且数C、D乘F分别得H、K。

因为：A是立方数，C是它的边，以及C自乘得E，

所以：C自乘得E，且C乘E得A。

同理可得：D自乘得G，且D乘G得B。

又因：C乘数C、D分别得E、F，

所以：C比D如同E比F。[VII. 17]

同理可得：C比D如同F比G。[VII. 18]

因为：C乘数E、F分别得A、H，

所以：E比F如同A比H。[VII. 17]

又因：E比F如同C比D，

所以：C比D如同A比H。

因为：数C、D乘F分别得H、K，

所以：C比D如同H比K。[VII. 18]

又因：D乘F、G分别得K、B，

所以：F比G如同K比B。[VII. 17]

因为：F比G如同C比D，

所以：C比D如同A比H，又如同H比K，也如同K比B，

因此：H、K是A、B之间的两比例中项数。

其次可以证明：A比B如同C比D的三次比。

因为：A、H、K、B是四个成连比例的数，

所以：A比B如同A比H的三次比。[V. 定义10]

又因：A比H如同C比D，

因此：A比B如同C比D的三次比。

证完。

命题13

…

若有一些数成连比例，且每个数自乘得某数，那么这些乘积成连比例；若原来这些数乘这些乘积得某些数，那么最后这些数也成连比例。

设：数A、B、C成连比例，也就是A比B如同B比C。

而A、B、C自乘得D、E、F，且A、B、C分别乘D、E、F，得G、H、K。

那么可以说：D、E、F和G、H、K分别成连比例。

设：A乘B得L，且数A、B分别乘L得M、N。

又设：B乘C得O，且数B、C乘O分别得P、Q。

由此，可以证明：D、L、E和G、M、N、H都是依照A与B之比而构成连比例。

并且，E、O、F和H、P、Q、K都是依照B与C之比而构成连比例。

因为：A比B如同B比C，

所以：D、L、E与E、O、F有相同比，

且G、M、N、H与H、P、Q、K也有相同比。

又因：D、L、E的个数等于E、O、F的个数，

且G、M、N、H的个数等于H、P、Q、K的个数，

那么，取首末比：

D比E如同E比F，

G比H如同H比K。[VII. 14]

证完。

命题14

…

若一个平方数量尽另一个平方数，那么其中一个的边也量尽另一个的边；若两平方数的一个的边量尽另一个的边，那么其一平方数也量尽另一平方数。

设：在平方数A、B中，C、D是它们的边，且A量尽B。

那么可以说：C也量尽D。

设：C乘D得E，

所以：A、E、B依照C与D的比成连比例。[VIII. 11]

因为：A、E、B成连比例，且A量尽B，

所以：A也量尽E。[VIII. 7]

又因：A比E如同C比D，

所以：C也量尽D。[VII. 定义20]

假如：C量尽D，

那么可以说：A也量尽B。

这是因为，用同样的作图，同理可证：A、E、B依照C与D之比成连比例。

又因：C比D如同A比E，且C量尽D，

所以：A也量尽E。[VII. 定义20]

又因：A、E、B成连比例，

因此：A也量尽B。

证完。

命题15

…

若一个立方数量尽另一个立方数，那么其中一个的边也量尽另一个的边；若两立方数的一个的边量尽另一个的边，那么这个立方数也量尽另一个立方数。

A　　C

B

D　　H

E　　K

G　　F

设：立方数A量尽立方数B，且C是A的边，且D是B的边。

那么可以说：C量尽D。

设：C自乘得E，而D自乘得G，

C乘D得F，且C、D分别乘F得H、K，

那么：E、F、G和A、H、K、B都是依照C与D之比成连比例。[VIIII. 11，12]

又因：A、H、K、B成连比例，且A量尽B，

所以：它也量尽H。[VIII. 7]

因为：A比H如同C比D，

所以：C也量尽D。[VII. 定义20]

又设：C量尽D，

那么可以说：A也量尽B，

因此：用同样作图，同理可证：A、H、K、B依照C与D之比成连比例。

因为：C量尽D，且C比D如同A比H。

所以：A也量尽H，[VII. 定义20]

所以：A也量尽B。

证完。

命题16

…

若一平方数量不尽另一平方数，那么其中一个的边也量不尽另一个的边；若两平方数的一个的边量不尽另一个的边，那么其中一平方数也量不尽另一平方数。

A————

B————————

C———

D————

设：在平方数A、B中，C、D是它们的边，且A量不尽B。

那么可以说：C也量不尽D。

假如：C量尽D，

那么A也量尽B。[VIII. 14]

又因：A量不尽B，

所以：C也量不尽D。

又设：C量不尽D，

那么可以说：A也量不尽B。

假如：A量尽B，

那么：C也量尽D。[VIII. 14]

因为：C量不尽D，

所以：A也量不尽B。

证完。

命题17

…

若一个立方数量不尽另一个立方数，那么其中一个的边也量不尽另一个的边；若两个立方数的一个边量不尽另一个边，那么其中一个立方数也量不尽另一个立方数。

A

B

C

D

设：在立方数A、B中，C是A的边，D是B的边，且A量不尽B。

那么可以说：C也量不尽D。

假如：C量尽D，

那么：A也量尽B。[VIII. 15]

又因：A量不尽B，

所以：C也量不尽D。

又设：C量不尽D，

那么可以说：A也量不尽B。

假如：A量尽B，

那么：C也将量尽D。[VIII. 15]

又因：C量不尽D，

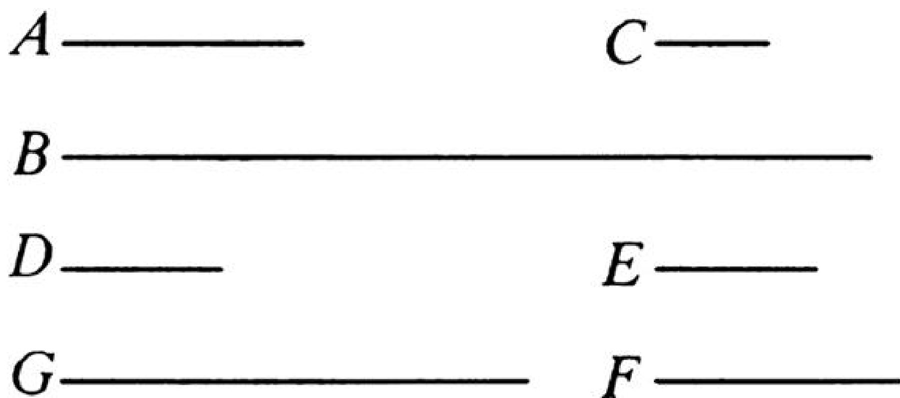
因此：A也将量不尽B。

证完。

命题18

…

两个相似面数之间必有一个比例中项数，且这两个数之比如同两对应边的二次比。



设：在两相似面数A、B中，数C、D是A的两边，E、F是B的两边。

因为：相似面数的两边对应成比例，[VII. 定义21]

所以：C比D如同E比F。

那么可以说：在A、B之间必有一个比例中项数，且A比B如同C对E的二次比，或如同D对F的二次比，也就是两对应边的二次比。

因为：C比D如同E比F，

所以，由更比：C比E如同D比F。[VII. 13]

因为：A是面数，且C、D是A的边，

所以：D乘C得A。

同理可得：E乘F得B。

设：D乘E得G。

因为：D乘C得A，且D乘E得G，

所以：C比E如同A比G。[VII. 17]

又因：C比E如同D比F，

所以：D比F如同A比G。

因为：E乘D得G，E乘F得B，

所以：D比F如同G比B。[VII. 17]

但已证明：D比F如同A比G，

所以：A比G如同G比B，

所以：A、G、B成连比例。

因此：在A、B之间有一个比例中项数。

其次可以证明：A比B如同对应边的二次比，也就是如同C与E或者D与F的二次比。

因为：A、G、B成连比例，

A比B如同A比G的二次比，[V. 定义9]

又因：A比G如同C比E，也如同D比F，

因此：A比B如同C与E，或者是D与F的二次比。

证完。

命题19

…

在两个相似体数之间，一定有两个比例中项数，且两相似体数之比等于它们对应边的三次比。

A C D

B

E F N

G H O

K L M

设：A、B是两个相似体数，C、D、E是A的边，F、G、H是B的边。

因为：相似体数的边对应成比例，[VII. 定义21]

所以：C比D如同F比G，

并且D比E如同G比H，

那么可以说：在A、B之间必有两个比例中项数，

且A比B如同C与F或者D与G或者E与H的三次比。

设：C乘D得K，且F乘G得L。

因为：C、D与F、G有相同比，

且K是C、D的乘积，L是F、G的乘积，K、L是相似面数，[VII. 定义21]

所以：在K、L之间有一个比例中项数。[VIII. 18]

设：比例中项数是M，

所以：M等于D、F的乘积，正如在之前的命题中所证明的那样。[VIII. 18]

因为：D乘C得K，且D乘F得M，

所以：C比F如同K比M。[VII. 17]

又因：K比M如同M比L，

所以：K、M、L依照C与F的比成连比例。

因为：C比D如同F比G，

所以，由更比：C比F如同D比G，[VII. 13]

同理可得：D比G如同E比H。

所以：K、M、L是依照C与F的比，D与G的比，和E与H的比成连比例。

又设：E、H乘M分别得N、O。

因为：A是一个体数，C、D、E是它的边，

所以：E乘C、D的积得A。

因为：C、D的积是K，

所以：E乘K得A。

同理可得：H乘L得B。

因为：E乘K得A，且E乘M得N，

所以：K比M如同A比N。[VII. 17]

又因：K比M如同C比F，D比G也如同E比H，

所以：C比F，D比G，以及E比H如同A比N。

因为：E、H乘M分别得N、O，

所以：E比H如同N比O。[VII. 18]

因为：E比H如同C比F和D比G，

所以：C比F，D比G，以及E比H如同A比N和N比O。

又因：H乘M得O，H乘L得B，

所以：M比L如同O比B。[VII. 17]

因为：M比L如同C比F，D比G如同E比H，

所以：C比F，D比G和E比H如同O比B，也如同A比N和N比O，

因此：A、N、O、B依前边的比成连比例。

其次，可以证明：A比B如同它们对应边的三次比，

也就是C与F或者D与G，以及E与H的三次比。

因为：A、N、O、B是四个成连比例的数，

所以：A比B如同A与N的三次比。[VII. 定义10]

由于，已经证明：A比N如同C比F，D比G，E比H，

因此：A比B如同它们对应边的三次比，也就是C与F，D与G，以及E与H的三次比。

证完。

命题20

…

若在两个数之间有一个比例中项数，那么这两个数是相似面数。

A——

B——

C——

D——

E——

F——

G——

设：数A、B的比例中项数是C。

那么可以说：A、B是相似面数。

设：D、E是与A、C有相同比中的最小数对，[VII. 33]

因此：D量尽A与E量尽C有相同的次数，[VII. 20]

那么：D量尽A有多少次数，就设在F中有多少个单位。

所以：F乘D得A，

因此：A是面数，而D、F是它的边。

因为：D、E是与C、B同比中最小数对，

所以：D量尽C与E量尽B有相同的次数，[VII. 20]

那么：依照E量尽B有多少次，就设G中有多少单位，

那么：依照G中的单位数，E量尽B，

所以：G乘E得B，

因此：B是一个面数，E、G是它的边，

所以：A、B是面数。

其次，可以证明：A、B是相似的。

因为：F乘D得A，且F乘E得C，

所以：D比E如同A比C，也就是如同C比B。[VII. 17]

因为：E乘F、G分别得C、B，

所以：F比G如同C比B。[VII. 17]

又因：C比B如同D比E，

所以：D比E如同F比G。

那么，由更比：D比F如同E比G。[VII. 13]

又因：A、B的边成比例，

因此：A、B是相似面数。

证完。

命题21

…

若在两个数之间有两个比例中项数，那么这两个数是相似体数。

A E

B

C F

D G

H L

K M

N O

设：数A、B之间有两个比例中项数C、D。

那么可以说：A、B是相似体数。

设：E、F、G是与A、C、D有相同比的最小数组。[VII. 33或VIII. 2]

因此：它们的两端E、G是互素的，

并且插在E、G之间有一个比例中项数F，

所以：E、G是相似面数。

设：H、K是E的边，L、M是G的边。

已知：E、F、G是以H与L，以及K与M的比成比例。

因为：E、F、G是与A、C、D有相同比中最小数组，且数E、F、G的个数等于数A、C、D的个数，

那么，取首末比：E比G如同A比D。[VII. 14]

又因：E、G是互素的，互素的数也是同比中最小的，[VII. 21]

所以：有相同比的数对中的最小一对数，能分别量尽其他数对，较大的量尽较大的，较小的量尽较小的，也就是前项量尽前项，后项量尽后项，并且量得的次数相同，[VII. 20]

所以：E量尽A与G量尽D有相同的次数，

那么：E量尽A有多少次，就设在N中有多少个单位，

因此：N乘E得A。

又因：E是H、K的乘积，

所以：N乘H、K的积得A，

因此：A是体数，H、KN是它的边。

因为：E、F、G是与C、D、B有相同比中的最小数组，

所以：E量尽C与G量尽B有相同的次数，

那么：E量尽C有多少次，就设O中有多少个单位，

所以：依照O中的单位数，G量尽B，

因此：O乘G得B。

因为：G是L、M的乘积，

所以：O乘L、M的积得B，

因此：B是体数，L、M、O是它的边，

所以：A、B是体数。

其次，可以证明：A、B是相似的。

因为：N、O乘E得A、C，

所以：N比O如同A比C，也就是E比F。[VII. 18]

又因：E比F如同H比L和K和M，

所以：H比L如同K比M和N比O。

又因：H、K、N是A的边，而O、L、M是B的边，

所以：A、B是相似体数。

证完。

命题22

…

若三个数成连比例，且第一个是平方数，那么第三个也是平方数。

A

B

C

设：A、B、C是三个成连比例的数，且第一个数A是平方数。

那么可以说：第三个数C也是平方数。

因为：在A、C之间有一个比例中项数B，

所以：A、C是相似面数。[VII. 20]

又因：A是平方数，

所以：C也是平方数。

证完。

命题23

…

若四个数成连比例，且第一个是平方数，那么第四个也是平方数。

A

B

C

D

设：A、B、C、D是四个成连比例的数，且A是立方数。

那么可以说：D也是立方数。

因为：A、D之间有两个比例中项数B、C，

所以：A、D是相似体数。[VIII. 21]

又因：A是立方数，

所以：D是立方数。

证完。

命题24

…

若两个数相比如同两个平方数相比，且第一个数是平方数，那么第二个数也是平方数。

A

B

C

D

设：两个数A、B相比如同平方数C比平方数D，且A是平方数。

那么可以说：B也是平方数。

因为：C、D是平方数，

所以：C、D是相似面数，

因此：在两数C、D之间有一个比例中项数。[VIII. 18]

又因：C比D如同A比B，

所以：在A、B之间也有一个比例中项数。[VIII. 8]

又因：A是平方数，

因此：B也是平方数。[VIII. 22]

证完。

命题25

…

若两个数相比如同两个立方数相比，且第一个数是立方数，那么第二个数也是立方数。

A
B
C
D
E
F

设：两数A、B相比如同立方数C比立方数D，且A是立方数。

那么可以说：B也是立方数。

因为：C、D是立方数，

所以：C、D是相似体数，

因此：在C、D之间有两个比例中项数。[VIII. 19]

因为：在C、D之间有多少个成连比例的数，就在与它们有相同比的数之间也有多少个成连比例的数，[VIII. 18]

因此：A、B之间也有两个比例中项数。

设：它们是E、F。

又因：四个数A、E、F、B成连比例，A是立方数，

所以：B也是立方数。[VIII. 23]

证完。

命题26

…

相似面数相比如同平方数相比。

设：A、B是相似面数。

那么可以说：A比B如同一个平方数比一个平方数。

因为：A、B是相似面数，

所以：在A、B之间有一个比例中项数。[VIII. 18]

设：这个数为C。

取D、E、F是与A、C、B有相同比中的最小数组，[VII. 33或VIII. 2]

所以：它们的两端D、F是平方数。[VIII. 2，推论]

又因：D比F如同A比B，且D、F是平方数，

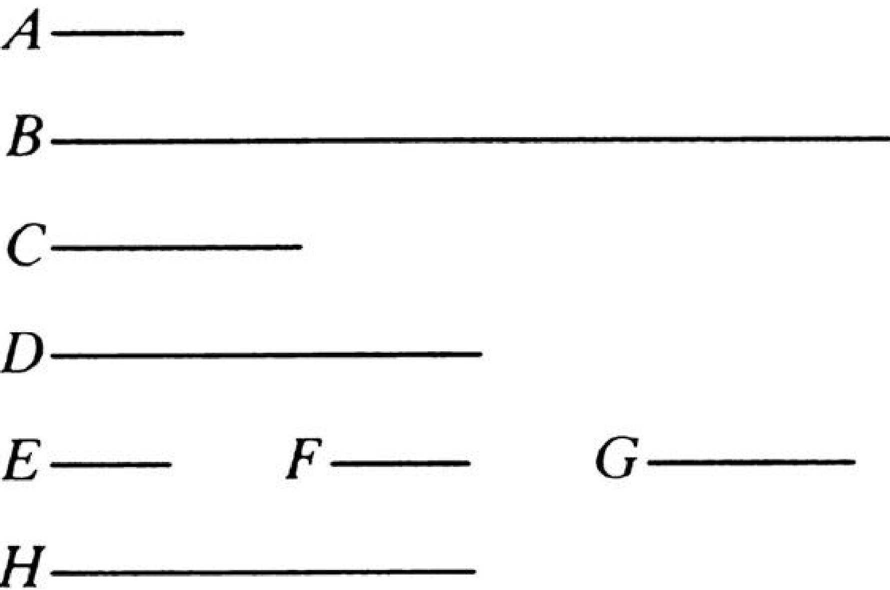
所以：A比B如同一个平方数比一个平方数。

证完。

命题27

…

相似体数相比如同立方数相比。



设：A、B是相似体数。

那么可以说：A比B如同一个立方数比一个立方数。

因为：A、B是相似体数，

所以：在A、B之间有两个比例中项数。[VIII. 19]

设：它们是C、D。

取E、F、G、H是与A、C、D、B有相同比中的最小数组，它们的个数相等，[VII. 33或VIII. 2]

那么：它们的两段E、H是立方数。[VIII. 2，推论]

又因：E比H如同A比B，

所以：A比B如同一个立方数比一个立方数。

证完。

卷IX

命题

命题1

…

假如两个相似面数相乘得某数，那么这个乘积是平方数。

A

B

C

D

设：两个相似面数为A、B，并且A乘B得C。

那么可以说：C是平方数。

设：A自乘得D，

那么：D是平方数。

因为：A自乘得D，且A乘B得C，

所以：A比B如同D比C。[VII. 17]

因为：A、B是相似面数，

所以：在A、B之间有一个比例中项数。[VIII. 18]

假如：在两个数之间有多少个数成连比例，就在那些有相同比的数之间也有多少个数成连比例。[VIII. 8]

所以：在D、C之间有一个比例中项数。

又因：D是平方数，

因此：C也是平方数。[VIII. 22]

证完。

命题2

…

假如两数相乘得一个平方数，那么它们是相似面数。

A ————

B ——————

C ————————————————

D ————————————

设：有两数A、B，且A乘以B得平方数C。

那么可以说：A、B是相似面数。

设：A自乘得D，

因此：D是平方数。

因为：A自乘得D，且A乘B得C，

所以：A比B如同D比C。[VII. 17]

因为：D是平方数，且C也是平方数，

所以：D、C都是相似面数，

因此：在数D、C之间有一个比例中项数。[VIII. 18]

又因：D比C如同A比B，

所以：在A、B之间也有一个比例中项数，[VIII. 8]

因为：假如在两个数之间有一个比例中项数，那么它们是相似面数，[VIII. 20]

所以：A、B是相似面数。

证完。

命题3

…

假如一个立方数自乘得某数，那么乘积是立方数。

A——

B————

C——

D——

设：立方数A自乘得B。

那么可以说：B是立方数。

设：C是A的边，且C自乘得D。

那么：C乘D得A。

因为：C自乘得D，

所以：C中的单位数C量尽D。

因为：依照C中的单位数，单位也量尽C，

所以：单位比C如同C比D。[VII. 定义20]

因为：C乘以D得A，

所以：依照C中的单位数，D量尽A。

因为：依照C中的单位数，单位量尽C，

所以：单位比C如同D比A。

又因：单位比C如同C比D，

所以：单位比C如同C比D，又如同D比A，

因此：在单位与数A之间有成连比例的两个比例中项数C、D。

因为：A自乘得B，

所以：依照A中的单位数，A量尽B。

因为：依照A中的单位数，单位也量尽A，

所以：单位比A如同A比B。[VII. 定义20]

又因：在单位与A之间有两个比例中项数，

因此：在A、B之间也有两个比例中项数。[VIII. 8]

假如：在两个数之间有两个比例中项数，并且第一个是立方数，那么第二个也是立方数。[VIII. 23]

又因：A是立方数，

所以：B也是立方数。

证完。

命题4

…

假如一个立方数乘一个立方数得某数，那么这个乘积也是立方数。

A

B

C

D

设：有立方数A、B，且A乘B得C。

那么可以说：C是立方数。

设：A自乘得D，

因此：D是立方数。[IX. 3]

因为：A自乘得D，且A乘B得C，

所以：A比B如同D比C。[VII. 17]

因为：A、B是立方数，

所以：A、B是相似体数，

因此：在A、B之间有两个比例中项数，[VIII. 19]

所以：在D、C之间也有两个比例中项数。[VIII. 8]

已知：D是立方数，

因此：C也是立方数。[VIII. 23]

证完。

命题5

…

假如一个立方数乘以某数得一个立方数，那么这个被乘数也是立方数。

A

B

C

D

设：立方数A乘以B得立方数C。

那么可以说：B是立方数。

设：A自乘得D，

因此：D是立方数。[IX. 3]

因为：A自乘得D，且A乘以B得C，

所以：A比B如同D比C。[VII. 17]

因为：D、C是立方数，

所以：它们是相似数体，

因此：在D、C之间有两个比例中项数。[VIII. 19]

又因：D比C如同A比B，

所以：在A、B之间也有两个比例中项数。[VIII. 8]

且已知，A是立方数，

因此：B也是立方数。[VIII. 23]

证完。

命题6

…

假如一个数自乘得一个立方数，那么它本身就是立方数。

A

B

C

设：数A自乘得立方数B，

那么可以说：A本身就是立方数。

设：A乘以B得C，

因为：A自乘得B，且A乘B得C，

所以：C是立方数。

又因：A自乘得B，

所以：依照A中的单位数，A量尽B。

因为：依照A中的单位数，单位也量尽A，

所以：单位比A如同A比B。[VII. 定义20]

因为：A乘以B得C，

所以：依照A中的单位数，B量尽C。

因为：依照A中的单位数，单位也量尽A，

所以：单位比A如同B比C。[VII. 定义20]

因为：单位比A如同A比B，

所以：A比B如同B比C。

因为：B、C是立方数，

所以：它们是相似体数，

因此：在B、C之间有两个比例中项数。[VIII. 19]

又因：B比C如同A比B，

所以：在A、B之间也有两个比例中项数。[VIII. 8]

已知：B是立方数，

所以：A也是立方数。[VIII. 23]

证完。

命题7

…

假如一个合数乘一数得某数，那么这个乘积是体数。

A

B

C

D　　E

设：合数A乘B得C，

那么可以说：C是体数。

因为：合数A能被某数D量尽，[VII. 定义13]

且设：数D量尽A的次数为E，

那么：D乘E得A，

所以：A是D、E的乘积。

因为：依照D量尽A有多少次，就设E中有同样多少单位，

并且依照E中的单位个数，D量尽A，

所以：E乘D得A。[VII. 定义15]

因为：A乘B得C，

且A是D、E的乘积，

所以：D、E的乘积乘以B得C，

所以：C是体数，且D、E、B分别是它的边。

证完。

命题8

…

假如从单位开始，有已给定的任意若干个数成连比例，那么从单位起的第三个是平方数，以后每隔一个也是平方数；第四个是立方数，以后每隔两个也是立方数；第七个是立方数也是平方数，以后每隔五个也都既是立方数也是平方数。

A ———

B ————

C ——————

D ————————

E ———————————

F ————————————————

设：由单位开始有数*A*、*B*、*C*、*D*、*E*、*F*成连比例。

那么可以说：从单位起的第三个数*B*是平方数，之后每隔一个数就是平方数；

*C*是第四个数，是立方数，以后每隔两个数就是立方数；

*F*是第七个数，是立方数也是平方数，以后每隔五个数是立方数也是平方数。

因为：单位比A如同A比B，

所以：单位量尽A与A量尽B有相同的次数。[XI. 定义20]

因为：依照A中的单位数，单位量尽A，

所以：依照A中的单位数，A也量尽B，

故：A自乘得B，

因此：B是平方数。

因为：B、C、D成连比例，且B是平方数，

所以：D也是平方数，[VIII. 22]

因此：F也是平方数。

同理可证：每隔一个数就是一个平方数。

可以证明：C是由单位起的第四个数，是立方数。以后每隔两个数都是立方数。

因为：单位比A如同B比C，

所以：单位量尽数A与B量尽C有相同的次数。

因为：依照A中的单位数，单位量尽A，

所以：依照A中的单位数，B量尽C，

因此：A乘以B得C。

因为：A自乘得B，且A乘B得C，

所以：C是立方数。

因为：C、D、E、F成连比例，且C是立方数，

所以：F也是立方数。[VIII. 23]

又因：它已被证明是平方数，

因此：由单位起第七个数既是立方数也是平方数。

同理可证：所有每隔五个数的数既是平方数也是立方数。

证完。

命题9

…

假如从单位开始，有已给定的任意若干个数成连比例，并且单位后面的数是平方数，那么所有其余的数也是平方数。假如单位后面的数是立方数，那么所有其余的数也是立方数。

A ——

B ——

C ——

D ——

E ——

F ——

设：由单位起给定连比例的几个数A、B、C、D、E、F，且单位后面的数A是平方数。

那么可以说：所有其余的数也是平方数。

因为：从单位起第三个数B是平方数，并且以后每隔一个数也是平方数，[IX. 8]

那么可以说：其余的数都是平方数。

因为：A、B、C成连比例，且A是平方数，

所以：C也是平方数。[VIII. 22]

又因：B、C、D成连比例，且B是平方数，D也是平方数，[VIII. 22]

同理可证：所有其余的数也是平方数，

设：A是立方数，

那么可以说：其余的数也是立方数。

因为：从单位起第四个数C是立方数，以后每隔两个都是立方数，[IX. 8]

那么可以说：所有其余的数也是立方数。

因为：单位比A如同A比B，

所以：单位量尽A与A量尽B有相同的次数。

又因：依照A中的单位数，单位量尽A，

所以：依照单位A中单位数，A也量尽B。

因此：A自乘得B。

因为：A是立方数，

且若一个立方数自乘得某个数，乘积也是立方数，[IX. 3]

所以：B也是立方数。

因为：A、B、C、D成连比例，A是立方数，

所以：D也是立方数。[VIII. 23]

同理可证：E也是立方数，所有其余的数都是立方数。

证完。

命题10

…

假如从单位开始，有已给定的任意若干个数成连比例，并且单位后面的数不是平方数，则除去从单位起的第三个和每隔一个数以外，其余的数都不是平方数。假如单位后面的数不是立方数，那么除去从单位起第四个和每隔两个数以外，其余的数都不是立方数。

A

B

C

D

E

F

设：由单位开始有成连比例的几个数A、B、C、D、E、F，且单位后的数A不是平方数。

那么可以说：除去从单位起第三个数和每隔一个数以外，其余的数都不是平方数。

这是因为，如果可能，设：C是平方数，B也是平方数，[IX. 8]

那么：B、C相比如同一个平方数比一个平方数。

又因：B比C如同A比B，

所以：A、B相比如同一个平方数比一个平方数，

因此：A、B是相似平面数。[VIII. 26，逆命题]

因为：B是平方数，

所以：A也是平方数，

这与假设不符合，

因此：C不是平方数。

同理可证：除了由单位起的第三个和每隔一个以外，其余的数都不是平方数。

设：A不是立方数。

那么可以说：除去由单位起第四个和每隔两个数以外，其余的数都不是立方数。

这是因为，如果可能，设：D是立方数。

因为：C是从单位起的第四个，

所以：C是立方数。[IX. 8]

因为：C比D如同B比C，

所以：B比C如同一个立方数比一个立方数。

又因：C是立方数，

所以：B也是立方数。[VIII. 25]

因为：单位比A如同A比B，且依照A中单位数，单位量尽A，

所以：依照A中的单位数，A量尽B，

因此：A自乘得立方数B。

因为：一个数自乘得一个立方数，它自己也是立方数，[IX. 6]

所以：A也是立方数，

这与假设不符合，

因此：D不是立方数。

同理可证：除去由单位起的第四个和每隔两个数以外，其余数都不是立方数。

证完。

命题11

…

假如从单位开始，有已给定的任意若干个数成连比例，那么依照成连比例中的某一个，较小数量尽较大数。

A

B

C

D

E

设：由单位A起，数B、C、D、E成连比例。

那么可以说：B、C、D、E中最小数B量尽E，所依照的是数C、D中的一个。

由于：单位A比B如同D比E，

因此：单位A量尽数B与D量尽E有相同的次数。

由更比：单位A量尽D与B量尽E有相同的次数。

因为：根据D中的单位数，A量尽D，

故：根据D中的若干单位数，B量尽E，

所以：依照所给成连比例中某一个数D，较小数B量尽较大数E。

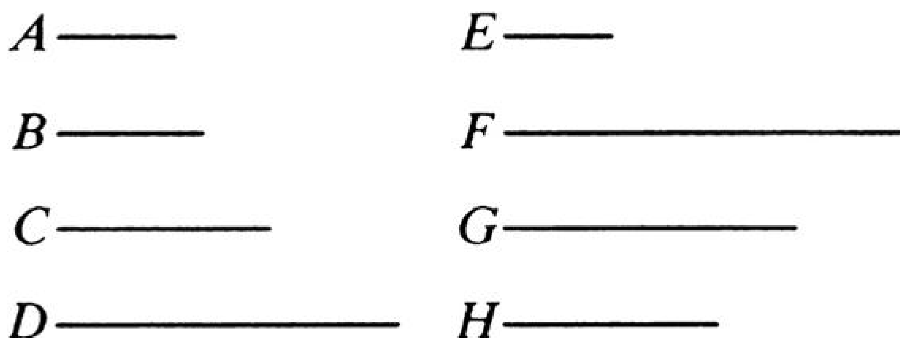
证完。

推论 由单位开始的成连比例的数，沿着量数前面的数的方向，所按照的数从被量数算起也有相同的位置。

命题12

…

假如从单位开始，有已给定的任意若干个数成连比例，不管有多少个素数量尽最后一个数，那么同样的素数也量尽单位之后的那个数。



设：由单位起有A、B、C、D成连比例。

那么可以说：不管有几个量尽D的素数，A也被同样的素数所量尽。

设：D被某个素数E量尽，

那么可以说：E量尽A。

设：E量不尽A，

因为：E是素数，

且任何素数与它量不尽的数是互素的，[VII. 29]

故：E、A是互素的。

由于：E量尽D，

设：按照F、E量尽D，

因此：E乘以F得D。

因为：按照C中的单位数，A量尽D，[IX. 11和推论]

故：A乘以C得D。

又有：E乘以F得D，

因此：A、C的乘积等于E、F的乘积，

故：A比E如同F比C。[VII. 19]

因为：A、E是互素的，

且互素的数也是最小的。[VII. 21]

又因：有相同比的数中的最小者以同样的次数量尽那些数，也就是前项量尽前项，后项量尽后项，[VII. 20]

那么，设：若按照数G，那么E量尽C，

故：E乘以G得C。

根据命题：A乘以B得C，[IX. 11和推论]

所以：A、B的乘积等于E、G的乘积，

因此：A比E如同G比B。[VII. 19]

又因：A、E是互素的，

且互素的数也是最小的，[VII. 21]

并且有相同比的数中的最小者，以同样的次数量尽那些数，也就是前项量尽前项，后项量尽后项，[VII. 20]

因此：E量尽B。

设：按照H、E量尽B，

故：E乘以H得B。

由于：A自乘得B，[IX. 8]

因此：E、H的积等于A的平方，

故：E比A如同A比H。[VII. 19]

因为：A、E是互素的，

且互素的数也是最小的，[VII. 21]

又因：有相同比的数中最小者量那些数时有相同次数，也就是前项量尽前项，后项量尽后项，[VII. 20]

所以：E量尽A，也就是前项量尽前项。

由于：已经假设E量不尽A，

这是不符合实际的，

因此：E、A不是互素的，它们互为合数。

因为：互为合数时可被某一数量尽，[VII. 定义14]

根据假设：E是素数，

且素数是除自己外，不被任何数量尽，

所以：E量尽A、E，

因此：E量尽A。

因为：E也量尽D，

故：E量尽A、D。

同理可证：不管有几个素数能量尽D，A也将被同一素数量尽。

证完。

命题13

…

假如从单位开始有任意多个成连比例的数，并且单位后面的数是素数，那么除这些成比例的数以外，任何数都量不尽其中最大的数。

A E
B F
C G
D H

假设：由单位起有数A、B、C、D成连比例，其中A是素数。

那么可以说：除A、B、C以外任何其他的数都量不尽它们中最大的数D。

设：D能被E量尽，E不同于A、B、C中的任何一个，且E不是素数。

由于：若E是素数并且量尽D，

那么：它也就能量尽A，[IX. 12]

根据假设：E不同于A，

因此：E不是素数。

所以：E是合数。

由于：任何合数都要被某一个素数量尽，[VII. 31]

故：E被某一素数量尽。

接下来，可以证明：除了A外E不被任何另外的素数量尽。

设：E被另外的素数量尽，且E量尽D，

所以：这个另外的数也将量尽A，

因此：它也量尽A，[IX. 12]

但是它不同于A，这是不符合实际的，

故：A量尽E。

因为：E量尽D，

设：E依照F量尽D，

那么可以说：F不同于数A、B、C中任何一个。

设：F与数A、B、C中一个相同，依照E量尽D，

那么：数A、B、C中之一也依照E量尽D。

由于：数A、B、C中之一依照数A、B、C之一量尽D，[IX. 11]

所以：E也必须与A、B、C中之一相同，

这是不符合实际的，

因此：F不同于A、B、C中任何一个。

同理可证：F被A量尽。

现在需要证明：F不是素数。

假如：F是素数，且量尽D，

那么：F也量尽素数A。[IX. 12]

又因：F不同于A，

这是不符合实际的。

因此：F不是素数，是合数。

因为：任何合数都可被某一个素数量尽，[VII. 31]

故：F被某一个素数量尽。

可以证明：除A外，F不能被任何另外的素数所量尽。

设：若有其他素数量尽F，且F量尽D，

那么：这个素数量尽D，

所以：它也量尽素数A。[IX. 12]

因为：它不同于A，

这是不符合实际的。

所以：A量尽F，

所以：依照F、E量尽D，那么E乘以F得D。

又因：A乘C得D，[IX. 11]

所以：A、C的乘积等于E、F的乘积，

因此：有比例，A比F如同F比C。[VII. 19]

又因：A量尽E，

因此：F也量尽C。

设：依照G量尽它，

同理可证：G不同于A、B中任何一个，且A量尽它。

因为：F依照G量尽C，

所以：F乘以G得C。

由于：A乘以B得C，[IX. 11]

故：A、B的乘积等于F、G的乘积。

因此：有比例，A比F如同G比B。[VII. 19]

因为：A量尽F，

所以：G也量尽B。

设：它依照H量尽B。

同理可证：H与A不同。

由于：G依照H量尽B，

因此：G乘以H得B。

又因：A自乘得B，[IX. 8]

所以：H、G的乘积等于A的平方，

因此：H比A如同A比G。[VII. 19]

因为：A量尽G，

因此：H也量尽素数A。

又因：H不同于A，

所以：这是不符合实际的，

因此：除A、B、C外任何另外的数量不尽最大的数D。

证完。

命题14

…

假如一个数是被一些素数能量尽的最小数，那么除之前量尽它的素数以外，任何其他素数都量不尽这个数。

A　　B

E　　C

F　　D

设：数A是被素数B、C、D量尽的最小数。

那么可以说：除B、C、D以外，任何另外的素数都量不尽A。

设：素数E能量尽它，且E和B、C、D中任何一个都不相同。

因为：E量尽A，且设E依照F量尽A，

所以：E乘F得A。

又因：A被素数B、C、D量尽，

且假如两个数相乘得某数，并且任一素数量尽这个乘积，那么它也量尽原来两数中的一个，[VII. 30]

所以：B、C、D量尽数E、F中的一个。

又因：E是素数，不同于数B、C、D中的任何一个，

因此：它们量尽F。

根据假设：A是被B、C、D量尽最小的数，

而F小于A，是不符合实际的，

所以：除B、C、D外没有素数量尽A。

证完。

命题15

…

假如成连比例的三个数是那些与它们有相同比的数中最小数组，那么它们中任何两个的和与其余的一个数互素。

A
B
C
D E F

设：三个成连比例的数*A*、*B*、*C*是与它们有相同比中的最小者。

那么可以说：*A*、*B*、*C*中任何两个的和与其余一个数互素。

也就是*A*、*B*之和与*C*互素；*B*、*C*之和与*A*互素；*A*、*C*之和与*B*互素。

设：已知数*DE*、*EF*是与*A*、*B*、*C*有相同比的数中最小者，[VIII. 2]

因为：*DE*自乘得*A*，且*DE*乘以*EF*得*B*，且*EF*自乘得*C*，[VIII. 2]

又因：*DE*、*EF*是最小的，它们互素，[VII. 22]

且假如两个素互素，那么它们的和与每一个数都互素，[VII. 28]

所以：DF与数DE、EF每一个互素。

又因：DE与EF互素，

所以：DF、DE与EF互素。

因为：假如两个数与任一数互素，它们的乘积也与该数互素，[VII. 24]

所以：DF、DE的积与EF互素，

所以：FD、DE的乘积也与EF的平方互素。[VII. 25]

因为：FD、DE的乘积是DE的平方与DE、EF乘积的和，[II. 3]

所以：DE的平方与DE、EF的乘积的和与EF的平方互素。

因为：DE的平方是A，DE、EF的乘积是B，EF的平方是C，

所以：A、B的和与C互素。

同理可证：B、C的和与A互素。

接下来可以证明：A、C的和与B互素，

因为：DF与DE、EF中的每一个互素，

所以：DF的平方也与DE、EF的乘积互素。[VII. 24, 25]

因为：DE、EF的平方加上DE、EF乘积的二倍等于DF的平方，[II. 4]

所以：DE、EF的平方加上DE、EF乘积的二倍与DE、EF的乘积互素。

取分比：DE、EF的平方与DE、EF乘积的和与DE、EF的乘积互素，

那么，再取分比：DE、EF的平方和与DE、EF的乘积互素。

又因：DE的平方是A，而DE、EF的乘积是B，且EF的平方是C，

因此：A、C的和与B互素。

证完。

命题16

…

假如两数是互素的，那么第一个数比第二个数不同于第二个与任何其他数相比。

设：两数A、B互素。

那么可以说：A比B不同于B比任何其他数。

设：A比B如同B比C，

因为：A、B互素，

互素的数也是最小的，[VII. 21]

又因：有相同比的数中的最小者以相同的次数量尽其他的数，前项量尽前项，后项量尽后项，[VII. 20]

所以：前项量尽前项，A量尽B。

又因：它也量尽自身，

所以：A量尽互素的数A、B。

这是不符合实际的。

因此：A比B不同于B比C。

证完。

命题17

…

假如有任意多个数成连比例，并且它们的两端是互素的，那么第一个比第二个不同于最后一个比任何另外一个数。

A B C D E

设：有成连比例的数A、B、C、D，其中A、D互素。

那么可以说：A比B不同于D比任何另外的数。

设：A比B如同D比E，

由更比：A比D如同B比E。[VII. 13]

因为：A、D互素，

互素的数也是最小的，[VII. 21]

且有相同比的数中最小者量其他数有相同的次数，也就是前项量尽前项，后项量尽后项。[VII. 20]

又因：A量尽B，且A比B如同B比C，

所以：B也量尽C，那么A也量尽C。

因为：B比C如同C比D，且B量尽C，

所以：C也量尽D。

因为：A也量尽C，那么A也量尽D，且A也量尽自己，

所以：A量尽互素的A、D。

这是不符合实际的。

因此：A比B不同于D比任意其他的数。

证完。

命题18

…

已知两个数，是否能求出第三比例数。

设：已知两数A、B，探寻它们能否求出第三个比例数。

那么：A、B要么互素，要么不互素。

设：A、B是互素的，

那么：已经证明不可能找到和它们成比例的第三个数。[IX. 16]

又设：A、B不互素，B自乘得C，

因此：A要么量尽C，要么量不尽C。

先设：A依照D量尽C，那么A乘D得C。

因为：B自乘得C，

所以：A、D的乘积等于B的平方，

所以：A比B如同B比D，[VII. 19]

因此：对A、B已经求到了第三个比例数D。

又设：A量不尽C，

那么可以说：A、B不可能求得第三个比例数。

设：已求到第三个比例数D，

那么：A、D的乘积等于B的平方。

又因：B的平方等于C，

所以：A、D的乘积等于C，

所以：A乘以D等于C，

因此：依照D、A量尽C。

又，根据假设：A量不尽C，

这是不合理的。

因此：当A量不尽C时，对数A、B不可能找到第三个比例数。

证完。

命题19

…

已知三个数，如何找到第四比例数。

A

B

C

D

E

设：已知A、B、C三个数，

要求：如何找到第四比例数。

因为：要么A、B、C不成连比例，两端是互素的；

要么成连比例，两端不是互素的；

要么不成连比例，两端也不互素；

要么成连比例，两端也互素。

若A、B、C成连比例，且两端A、C互素。

那么：已经证明它们不可能找到第四比例数。[IX. 17]

又设：A、B、C不成连比例，而两端A、C仍然互素。

那么可以说：不可能找到第四比例数。

这是因为，如果可能，设：D是第四比例数，

其中A比B如同C比D，且存在数E，令B比C如同D比E。

因为：A比B如同C比D，且B比C如同D比E，

因此，取首末比：A比C如同C比E。[VII. 14]

因为：A、C是互素的，互素的数也是最小的，[VII. 21]

且有相同比的数中的最小者，以相同倍数量尽其余的数，也就是前项量尽前项，后项量尽后项，[VII. 20]

所以：作为前项量尽前项，A量尽C。

又因：A也量尽自己，

所以：A量尽互素的数A、C。

这是不符合实际的。

因此：A、B、C不可能找到第四比例数。

又设：A、B、C成连比例，而A、C不互素，

那么可以说：它们可能找到第四比例数。

设：B乘以C得D，

因此：A要么量尽D，要么量不尽D。

设：A依照E量尽D，

因此：A乘E得D。

因为：B乘以C得D，

所以：A、E的乘积等于B、C的乘积，

因此：A比B如同C比E，[VII. 19]

因此：对A、B、C已经找到第四比例数E。

设：A量不尽D。

那么可以说：A、B、C不可能找到第四比例数。

设：E为第四比例数，

因此：A、E乘积等于B、C乘积。[VII. 19]

因为：B、C的乘积是D，

所以：A、E的乘积等于D，

因此：A乘以E得D，也就是A依照E量尽D。

因此：A量尽D。

又，根据假设：A量不尽D，

这是不符合实际的。

所以：当A量不尽D时，对A、B、C不可能找到第四比例数。

设：A、B、C既不成连比例，A、C不互素，

再设：B乘C得D，

同理可证：当A量尽D时，它们能找到第四比例数，

当A量不尽D时，就不可能找到第四比例数。

证完。

命题20

…

已知任意多个素数，那么有比它们更多的素数。

设：已知素数A、B、C，

那么可以说：有比A、B、C更多的素数。

设：能被A、B、C量尽的最小数为DE，且DE的单位是DF。

那么：EF要么是素数，要么不是素数。

先设：EF是素数，

那么：已经找到多于A、B、C的素数A、B、C、EF。

又设：EF不是素数，那么EF能被某个素数量尽。[VII. 31]

设：EF能被素数G量尽，

那么可以说：G与数A、B、C任何一个都不相同。

这是因为，如果可能，设：它是这样。

因为：A、B、C能量尽DE，

所以：G也量尽DE。

又因：它也量尽EF，

所以：G作为一个数，将量尽剩余的数，也就是量尽单位DF。

这是不符合实际的。

因此：G与数A、B、C任何一个数都不同。

又，根据假设：G是素数，

因此：已经找到素数A、B、C、G，它们的个数多于已知的A、B、C的个数。

证完。

命题21

…

假如把任意多的偶数相加，那么总和是偶数。



设：将偶数AB、BC、CD、DE相加。

那么可以说：总和AE是偶数。

因为：数AB、BC、CD、DE的每一个都是偶数，它们有一个半部分，[VII. 定义6]

所以：总和AE也有一个半部分。

又因：可以被分成相等的两部分的数是偶数，[VII. 定义6]

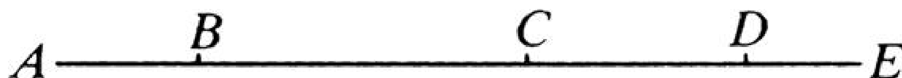
因此：AE是偶数。

证完。

命题22

…

假如把任何多个奇数相加，并且它们的个数是偶数，那么总和将是偶数。



设：有偶数个奇数*AB*、*BC*、*CD*、*DE*相加，

那么可以说：总和*AE*是偶数。

因为：数*AB*、*BC*、*CD*、*DE*每一个都是奇数，假如从每一个减去一个单位，所得的余数是偶数，[VII. 定义7]

所以：它们的总和是偶数。[IX. 21]

又因：单位的个数也是偶数个，

因此：总和*AE*也是偶数。

证完。

命题23

…

假如把一些奇数相加，并且它们的个数是奇数，那么所得的数也是奇数。



设：奇数*AB*、*BC*、*CD*相加，它们的个数是奇数，

那么可以说：总和*AD*是奇数。

设：从*CD*中减去单位*DE*，

那么：余数*CE*是偶数。[VII. 定义7]

因为：*CA*也是偶数，[IX. 22]

所以：总和*AE*也是偶数。[IX. 21]

又因：*DE*是一个单位，

所以：*AD*是奇数。[VII. 定义7]

证完。

命题24

…

假如从偶数中减去偶数，那么余数也是偶数。



设：从偶数*AB*中减去偶数*BC*。

那么可以说：余数*CA*也是偶数。

因为：*AB*是偶数，它有一个半部分，[VII. 定义6]

同理可证：*BC*也有一个半部分，

所以：余数*CA*也有一个半部分，

因此：余数*AC*也是偶数。

证完。

命题25

…

假如从一个偶数减去一个奇数，那么余数也是奇数。



设：从偶数AB减去奇数BC。

那么可以说：余数CA也是奇数。

设：从BC减去单位CD，

那么：DB是偶数。[VII. 定义7]

因为：AB是偶数，

所以：余数AD也是偶数。[IX. 24]

又因：CD是一个单位，

因此：CA也是奇数。[VII. 定义7]

证完。

命题26

…

假如从一个奇数减去一个奇数，那么余数是偶数。



设：从奇数*AB*中减去奇数*BC*，

那么可以说：*CA*是偶数。

设：从奇数*AB*中减去单位*BD*，

那么：余数*AD*是偶数。[VII. 定义7]

同理可证：*CD*也是偶数。[VII. 定义7]

所以：余数*CA*是偶数。[IX. 24]

证完。

命题27

…

假如从一个奇数减去一个偶数，那么余数是奇数。



设：从奇数*AB*减去偶数*BC*。

那么可以说：余数*CA*是奇数。

设：从奇数*AB*减去单位*AD*，

那么：*DB*是偶数。[VII. 定义7]

因为：*BC*是偶数，

所以：余数CD是偶素，[IX. 24]

因此：CA是奇数。[VII. 定义7]

证完。

命题28

…

假如一个奇数乘一个偶数，那么此乘积是偶数。

A——

B——

C——

设：奇数A乘以偶数B得C。

那么可以说：C是偶数。

因为：A乘以B得C，

所以：在A中有多少单位，C中就有多少个等于B的数相加。[VII. 定义15]

因为：B是偶数，

所以：C是一些偶数的和。

又因：假如一些偶数加在一起，那么总和也是偶数，[IX. 21]

因此：C是偶数。

证完。

命题29

…

假如一个奇数乘一个奇数，那么乘积仍是奇数。

A ——

B ——

C ——

设：奇数A乘奇数B得C。

那么可以说：C是奇数。

因为：A乘以B得C，

所以：在A中有多少个单位，C中就有多少个等于B的数相加。[VII. 定义15]

又因：数A、B的每一个是奇数，

所以：C是奇数个奇数的和，

因此：C是奇数。[XI. 23]

证完。

命题30

…

假如一个奇数量尽一个偶数，那么这个奇数也量尽这个偶数的一半。

设：奇数A量尽偶数B。

那么可以说：A也量尽B的一半。

因为：A量尽B，

设：A量尽B得C，

那么可以说：C不是奇数，

这是因为，如果可能，设：C是奇数。

因为：A量尽B得C，

所以：A乘以C得B，

所以：B是奇数个奇数的和，

因此：B是奇数。

这是不符合实际的。[IX. 23]

又，根据假设：它是偶数，

所以：C不是奇数，是偶数，

那么：A偶数次量尽B，

因此：A也量尽B的一半。

证完。

命题31

…

假如一个奇数与某数互素，那么这个奇数与此数的二倍互素。

A———

B—————

C——————————

D——

设：奇数A与数B互素，且C是B的二倍。

那么可以说：A与C互素。

设：若A与C不互素，那么有D量尽它们。

因为：A是奇数，

所以：D也是奇数。

因为：D是量尽C的奇数，且C是偶数，

所以：D也量尽C的一半。[IX. 30]

又因：B是C的一半，

所以：D量尽B。

因为：D也量尽A，

所以：D量尽互素的数A、B，

这是不符合实际的。

所以：A不得不与C互素，

因此：A、C是互素的。

证完。

命题32

…

从二开始，连续二倍起来的数列中的每一个数仅是偶倍偶数。

A

B

C

D

设：B、C、D是从A为二开始连续二倍起来的数。

那么可以说：B、C、D仅是偶倍偶数。

因为：B、C、D从二开始被加倍，

所以：B、C、D的每一个是偶倍偶数。

可以证明：它们中的每一个也仅是偶倍偶数。

设：从一个单位开始，

因为：从单位开始的几个成连比例的数，单位后面的一个数A是素数，

所以：数A、B、C、D中最大者D，除A、B、C外没有任何数量尽它。[IX. 13]

因为：数A、B、C的每一个是偶数，

所以：D仅是偶倍偶数。[VII. 定义8]

同理可证：B、C中的每一个也仅是偶倍偶数。

证完。

命题33

…

假如一个数的一半是奇数，那么它仅是偶数奇数。

A

设：数A的一半是奇数。

那么可以说：A仅是偶倍奇数。

因为：A的一半是奇数，此奇数量尽原数的次数为偶数，[VII. 定义

9]

所以：A是偶倍奇数。

可以证明：它仅是偶倍奇数。

因为：若A也是偶倍偶数，

那么：它被一个偶数量尽的次数是偶数，[VII. 定义8]

所以：它的一半是奇数，它的一半也将被一个偶数量尽。

这是不符合实际的。

因此：A仅是偶倍奇数。

证完。

命题34

…

假如一个数既不是从二开始连续二倍起来的数，它的一半也不是奇数，那么它是偶倍偶数，也是偶倍奇数。

A

设：数A既不是从二开始连续二倍起来的数，它的一半也不是奇数。

那么可以说：A既是偶倍偶数，也是偶倍奇数。

因为：A的一半不是奇数，[VII. 定义8]

所以：A是偶倍偶数。

可以证明：它也是偶倍奇数。

设：平分A，再平分它的一半，并且一直这样平分下去，

那么：就会得到某个奇数，它量尽A的次数是偶数。

因为：如果不是这样，就会得到二，

因此：A是从二开始连续二倍起来的数中的数。

这与假设矛盾。

所以：A是偶倍奇数。

又因：已经证明了A也是偶倍偶数，

所以：A是偶倍偶数，也是偶倍奇数。

证完。

命题35

…

假如已知有任意多个数成连比例，又从第二个与最后一个数中减去等于第一个的数，那么从第二个数得的余数比第一个数如同从最后一个数得的余数比最后一个数以前各项之和。

A
B G C
D
E L K H F

设：从最小的A开始的一些数A、BC、D、EF成连比例，

且从BC和EF中减去等于A的数BG、FH。

那么可以说：GC比A如同EH比A、BC、D之和。

那么，设：FK等于BC，且FL等于D。

因为：FK等于BC，其中部分FH等于部分BG，

所以：余数HK等于余数GC。

因为：EF比D如同D比BC，且如同BC比A，

而D等于FL，且BC等于FK，且A等于FH，

所以：EF比FL如同LF比FK，也如同FK比FH。

又，由分比：EF比LF如同LK比FK，又如同KH比FH，[VII. 11, 13]

所以：前项之一比后项之一，如同所有前项的和比所有后项的和，[VII. 12]

因此：KH比FH如同EL、LK、KH之和比LF、FK、HF之和。

因为：KH等于CG，且FH等于A，而LF、FK、HF之和等于D、BC、A之和，

所以：CG比A如同EH比D、BC、A的和，

因此：从第二个数得的余数比第一个数如同从最后一个数得的余数比最后一个数以前各项之和。

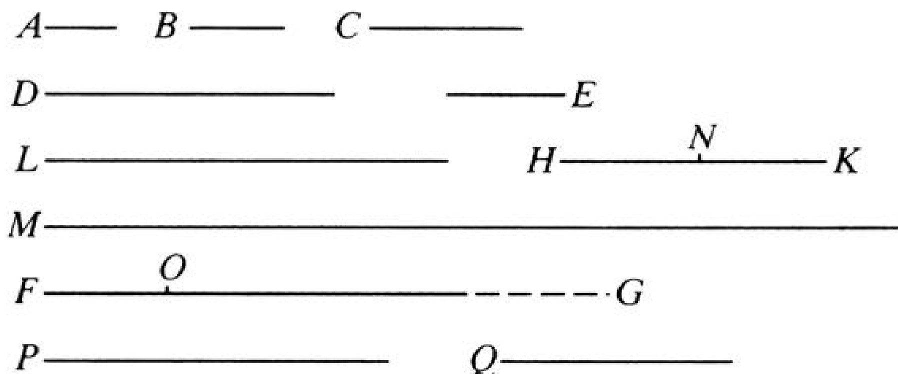
证完。

命题36

…

假设从单位起有多个连续二倍起来的连比例数，如果所有数的和是素

数，那么这个和乘最后一个数的乘积是一个完全数。



设：从单位起A、B、C、D是连续二倍起来的连比例数，其所有的和是素数，且E等于其和，E乘D得FG。

那么可以说：FG是完全数。

因为：不管A、B、C、D有多少个，就设有同样多个数E、HK、L、M，是从E开始连续二倍起来的连比例数，

那么，取首末比：A比D如同E比M，[VII. 14]

因此：E、D得乘积等于A、M的乘积。[VII. 19]

因为：E、D的乘积是FG，

所以：A、M的乘积也是FG。

因为：A乘M得FG，

所以：依照A中单位数，M量尽FG。

因为：A是二，

所以：FG是M的二倍。

因为：M、L、HK、E是彼此连续二倍起来的数，

所以：E、HK、L、M、FG是连续二倍起来的连比例数。

设：从第二个HK和最后一个FG减去等于第一个E的数HN、FO，

那么：从第二个得的余数比第一个如同从最后一个数得的余数比最后一个数以前各项之和，[IX. 35]

因此：NK比E如同OG比M、L、HK、E之和。

因为：NK等于E，

所以：OG等于M、L、HK、E之和。

因为：FO等于E，且E等于A、B、C、D与单位之和，

所以：整体FG等于E、HK、L、M与A、B、C、D以及单位之和，FG被它们所量尽。

又，可以证明：除A、B、C、D、E、HK、L、M以及单位以外，其他的数都量不尽FG。

这是因为，如果可能，设：某数P可以量尽FG，

且P与数A、B、C、D、E、HK、L、M中任何一个都不相同，

并且，不管P量尽FG有多少次，就设在Q中有多少个单位，故Q乘P得FG。

因为：E乘D得FG，

所以：E比Q如同P比D。[VII. 19]

因为：A、B、C、D是由单位起的连比例数，

所以：除A、B、C外，任何其他的数量不尽D。[IX. 13]

又，根据假设：P不同于数A、B、C任何一个，

因此：P量不尽D。

因为：P比D如同E比Q，

所以：E也量不尽Q。[VII. 定义20]

因为：E是素数，

任一素数与它量不尽的数互素，[VII. 29]

所以：E、Q互素。

因为：互素的数也是最小的，[VII. 21]

且有相同比的最小数，以相同的次数量尽其他的数，也就是前项量尽前项，后项量尽后项，[VII. 20]

又因：E比Q如同P比D，

所以：E量尽P与Q量尽D有相同的次数。

因为：除A、B、C外，任何其他的数都量不尽D，

所以：Q与A、B、C中的一个相同。

设：Q与B相同，

因为：无论有多少个B、C、D，都设从E开始也取同样多个数E、HK、L，

且E、HK、L与B、C、D有相同比，

那么，取首末比：B比D如同E比L，[VII. 14]

因此：B、L的乘积等于D、E的乘积。

因为：D、E的乘积等于Q、P的乘积，[VII. 19]

所以：Q、P的乘积等于B、L的乘积。

因此：Q比B如同L比P，[VII. 19]

又因：Q与B相同，

所以：L与P相同，

这是不符合实际的，

因此：由假设P与给定的数中任何一个都不相同，

因此：除A、B、C、D、E、HK、L、M和单位外，没有数量尽FG。

且已经证明：FG等于A、B、C、D、E、HK、L、M以及单位的和，

因为：一个完全数是等于它自己所有部分的和的数，[VII. 定义22]

所以：FG是完全数。

证完。

卷X

定义I

01 能被同一量量尽的那些量叫作可公度的量，不能被同一量量尽的那些量叫作不可公度的量。

02 当一些线段上的正方形能被同一面所量尽时，这些线段叫作正方可公度的。当一些线段上的正方形不能被同一面量尽时，这些线段叫作正方不可公度的。

03 由这些定义，可以证明，给定的线段分别存在无穷多个可公度的线段与无穷多个不可公度的线段。一些仅是长度不可公度，而另外一些也是正方不可公度。此时把给定的线段叫作有理线段，凡与此线段不仅是长度，也是正方可公度或仅是正方可公度的线段，都叫作有理线段。而凡与此线段在长度和正方形都不可公度的线段叫作无理线段。

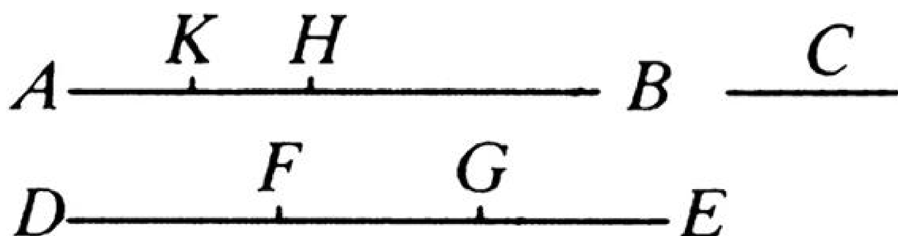
04 又设把给定一线段上的正方形叫作有理的，凡与此面可公度的叫作有理的；凡与此面不可公度的叫作无理的，并且构成这些无理面的线段叫作无理线段，也就是说，当这些面为正方形时即指其边，当这些面为其他直线形时，则指与面相等的正方形的边。

命题

命题1

…

已知两个不相等的量，如果从较大的量中减去一个大于它的一半的量，再从所得的余量中减去大于这个余量一半的量，并且持续这样进行下去，那么必得一个余量小于较小的量。



设：有两个不相等的量AB、C，其中AB较大。

那么可以说：如果从AB减去一个大于它的一半的量，再从余量中减去大于这个余量的一半的量，以此连续下去必得一个余量，比量C更小。

因为：C的若干倍总可以大于AB。[V. 定义4]

设：DE是C的若干倍，DE大于AB；

将DE分成等于C的几部分DF、FG、GE，

从AB中减去大于它一半的BH，又从AH减去大于它一半的HK，

继续这个过程，直到分AB的个数等于DE的个数。

又设：被分得的AK、KH、HB的个数等于DF、FG、GE的个数。

因为：DE大于AB，从DE减去小于它一半的EG，再从AB中减去大于它一半的BH，

所以：余量*GD*大于余量*HA*。

因为：*GD*大于*HA*，从*DG*减去了它的一半*GF*，又从*HA*减去大于它一半的*HK*，

那么：余量*DF*大于余量*AK*。

因为：*DF*等于*C*，

所以：*C*大于*AK*，

所以：*AK*小于*C*，

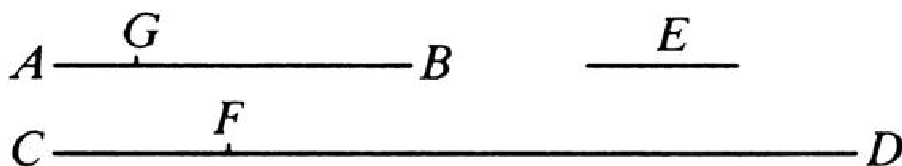
因此：量*AB*的余量*AK*小于原来给定的较小量*C*。

证完。

命题2

…

假如从两不等量的大量连续减去小量，直到余量小于小量，再从小量中连续减去余量直到小于余量，这样一直进行下去，继续到当所余的量总不能量尽它前面的量时，那么称两个量不可公度。



设：*AB*、*CD*是两个不相等的量，其中*AB*较小。

从较大量中连续减去较小的量，直到余量小于小量，再从小量中连续减去余量直到小于余量。这样一直进行下去，所余的量不能量尽它前面的量。

那么可以说：*AB*、*CD*是不可公度的。

这是因为，如果是可公度的，就有某个量能量尽它们。

设：AB、CD可以公度，E能量尽它们。

则AB量CD得FD，余下的CF小于AB。

且CF量AB得BG，余下的AG小于CF。持续到直到余下量小于E。

那么：余量AG小于E。

因为：E能量尽AB，且AB能量尽DF，

所以：E也能量尽FD。

因为：它也能量尽整个CD，

所以：它也能量尽余量CF。

因为：CF能量尽BG，

所以：E也能量尽BG。

因为：它也能量尽整个AB，

所以：它也能量尽余量AG。

较大的量量尽较小的量，这是不符合实际的。

所以：没有一个量能量尽AB、CD，

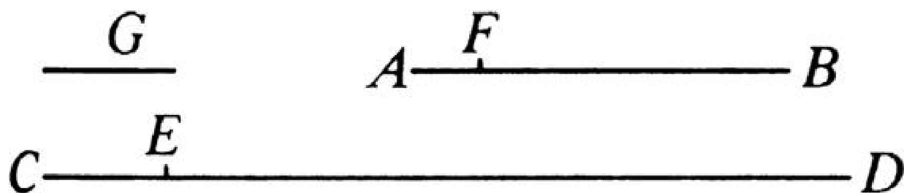
因此：量AB、CD是不可公度的。[X. 定义1]

证完。

命题3

…

已知两个可公度的量，求它们的最大公度量。



设：已知AB、CD是两个可公度的量，其中AB是较小的，

要求：找出AB、CD的最大公度量。

那么：量AB要么能量尽CD，要么量不尽CD。

设：AB能量尽CD，

因为：AB也能量尽自己，

所以：AB是AB、CD的一个公度量。

因为：大于AB的不能量尽AB，

所以：AB是AB、CD公度量中最大的。

设：AB量不尽CD，

因为：AB、CD不是不可公度的。

所以：倘若连续从大量中减去小量直到余量小于小量，再从小量中连续减去余量直到小于余量，继续到有一余量能量尽它前面一个。[参看X. 2]

设：AB量CD得ED，余下的EC小于AB；

且EC量AB得FB，余下的AF小于CE；AF能量尽CE。

因为：AF能量尽CE，CE能量尽FB，

所以：AF能量尽FB。

因为：AF也能量尽自己，

所以：AF也将量尽整体AB。

因为：AB量尽DE，

所以：AF也量尽ED。

因为：它也量尽CE，

所以：它也量尽整体CD，

因此：AF是AB、CD的公度量。

那么，可以证明：AF也是最大的。

这是因为，如果不是如此，有量尽AB、CD的某个量大于AF，设它为G，

因为：G量尽AB，AB量尽ED，

因此：G也量尽ED。

因为：它也量尽整体CD，

所以：G也量尽余量CE，

所以：G也量尽整体CD，

因此：G也量尽余量CE。

因为：CE量尽FB，

所以：G也量尽FB。

因为：G也量尽整个AB，

所以：G也量尽余量AF。

较大的量尽较小的，这是不符合实际的。

因此：没有大于AF的量能量尽AB、CD，

所以：AF是AB、CD的最大公度量。

因此：求出了两个已知可公度的量AB、CD的最大公度量。

证完。

推论 假如一个量能量尽两个量，那么它也量尽它们的最大公度量。

命题4

…

已知三个可公度的量，求它们的最大公度量。

A———————

B————

C———

D——　　E——　　F——

设：已知可公度的量A、B、C，

要求：求出A、B、C的最大公度量。

设：A，B的最大公度量是D。[X. 3]

那么：D要么量尽C，要么量不尽C。

先设：D可以量尽C。

因为：D量尽C，且它也量尽A、B，

所以：D是A、B、C的一个公度量。

因为：任何大于D的量都不能量尽A、B，

所以：D也是最大公度量。

又设：D量不尽C。

可以证明：C、D是可公度的。

因为：A、B、C是可公度的，必然有个量可以量尽它们，也量尽A、B，

所以：它也将量尽A、B的最大公度量D。[X. 3，推论]

因为：它也量尽C，

所以：也能量尽C、D，

所以：C、D是可公度的。

设：C、D的最大公度量是E。[X. 3]

因为：E量尽D，且D量尽A、B，

所以：E也将量尽A、B，

又因：它也量尽C，

所以：E量尽A、B、C，

因此：E是A、B、C的一个公度量。

其次，可以证明：E也是最大公度量。

这是因为，如果可能，设：有大于E的量F，可以量尽A、B、C。

因为：F量尽A、B、C，也量尽A、B，

因此：F量尽A、B的最大公度量。[X. 3，推论]

因为：A、B的最大公度量是D，

所以：F量尽D。

因为：F也量尽C，

那么：F量尽C、D，

所以：F也量尽C、D的最大公度量E，[X. 3，推论]

较大的量能量尽较小的量，这是不符合实际的，

所以：没有一个大于E的量能量尽A、B、C，

因此：假如D量不尽C，那么E是A、B、C的最大公度量。

假如D量尽C，那么D就是最大公度量，

因此：求出了已知的三个可公度的最大公度量。

证完。

推论 若一个量能量尽三个量，那么它也量尽它们的最大公度量。

同理，可以求出更多个可公度量的最大公度量。

同理可证：任何多个量的公度量也能量尽它们的最大公度量。

命题5

…

两个可公度量的比如同一个数与一个数的比。

设：有可公度的两个量A、B。

那么可以说：A与B的比如同一数与另一数的比。

设：C是可以公度A、B的量。

且C量尽A有多少次，就设在D中有多少个单位；

C量尽B有多少次，就设在数E中有多少个单位。

因为：依照D中若干单位，C量尽A；按照D中的若干单位，单位也量尽D，

所以：单位量尽数D的次数与C量尽A的次数相同，

因此：C比A如同单位比D，[VII. 定义20]

所以，由反比：A比C如同D比单位。[参看V. 7，推论]

因为：按照E中若干单位，C量尽B；按照E中若干单位，单位也量尽E，

所以：单位量尽E的次数与C量尽B的次数相同，

因此：C比B如同单位比E。

又，已经证明：A比C如同数D比单位，

那么：取首末比，A比B如同数D比数E，[V. 22]

因此：两个可公度的量A比B如同数D比另一个数E。

证完。

命题6

…

假如两个量的比如同一个数比一个数，那么这两个量将是可公度的。

设：两个量A比B如同数D比数E。

那么可以说：A、B是可公度的。

设：在D中有若干单位把A分成若干相等的部分，设C等于其中一个。

且数E中有若干单位，取F为若干个等于C的量。

因为：在D中有多少单位，

所以：A中就有多少个等于C，

那么：不管单位是D怎样的一部分，C也是A的一部分，

因此：C比A如同单位比D。[VII. 定义20]

因为：单位量尽数D，

所以：C也量尽A。

因为：C比A如同单位比D，

因此，由反比：A比C如同数D比单位。[参看V. 7，推论]

因为：E中有多少个单位，在F中就有多少个等于C的量，

所以：C比F如同单位比E。[VII. 定义20]

又，已证明：A比C如同D比单位，

因此，取首末比：A比F如同D比E。[V. 22]

因为：D比E如同A比B，

所以：A比B如同A比F。[V. 11]

因为：A与量B、F的每一个有相同的比，

所以：B等于F。[V. 9]

因为：C量尽F，

所以：它也量尽B。

因为：它也量尽A，

因此：C量尽A、B，

所以：A与B是可公度的。

证完。

推论　假如有两数D、E和一条线段A，那么可以作出一线段F使得已知线段A比F如同数D比数E。

若取A、F的比例中项为B，那么A比F如同A上的正方形比B上的正方形，那么第一线段比第三线段将如同第一线段上的图形比第二线段上与之相似的图形。[VI. 19，推论]

因为：A比F如同数D比数E，

因此：作了数D与数E之比如同线段A上图形与线段B上图形之比。

证完。

命题7

…

不可公度的两个量的比不同于一个数比另一个数。

A

B

设：有不可公度的两个量A、B。

那么可以说：A与B的比不同于一个数比另一个数。

假如：A比B如同一个数比另一个数，

那么：A与B是可公度的。[X. 6]

但这并不符合实际。

因此：A比B不同于一个数比另一个数。

证完。

命题8

…

假如两个量的比不可能如同于一个数比另一个数，那么这两个量不可公度。

A

B

设：两个量A与B之比不可能如同一个数比另一个数。

那么可以说：两个量A、B不可公度。

设：A、B是可公度的。

那么：A比B如同一个数比另一个数。[X. 5]

但这并不符合实际。

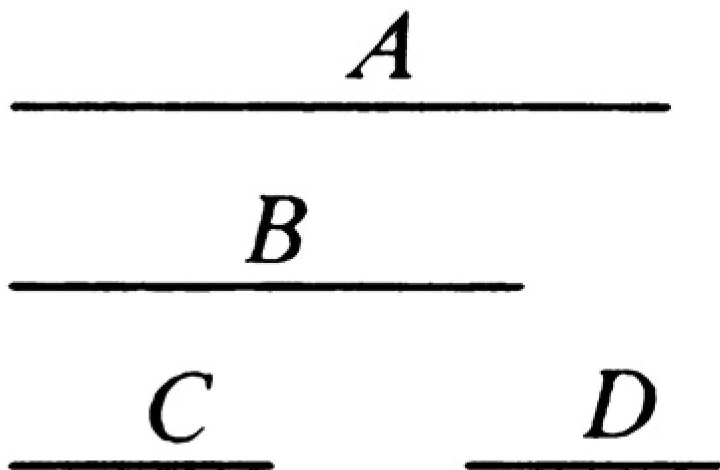
因此：量A、B是不可公度的。

证完。

命题9

…

两长度可公度的线段上的正方形之比如同一个平方数比一个平方数；假如两正方形的比如同一个平方数比一个平方数，那么两正方形的边长长度是可公度的。但两长度不可公度的线段上的正方形的比不同于一个平方数比一个平方数；假如两个正方形之比不同于一个平方数比一个平方数，那么它们的边的长度也不是可公度的。



设：有两个长度可公度的线段A、B。

那么可以说：A上的正方形比B上的正方形如同一个平方数比一个平

方数。

因为：A与B长度是可公度的，

所以：A与B之比如同一个数比另一个数。

设：两个数之比是C比D，

所以：A比B如同C比D，且A上的正方形与B上的正方形的比如同A与B的二次比。

因为：相似图形之比如同它们对应边的二次比，[IV. 20，推论]

且C的平方与D的平方之比如同C与D的二次比，

又因：在两个平方数之间有一个比例中项数，平方数比平方数如同它们边与边的二次比，[VIII. 11]

所以：A上的正方形比B上的正方形如同C的平方数与D的平方数之比。

又设：A上的正方形比B上的正方形如同C的平方数比D的平方数。

那么可以说：A与B是长度可公度的。

因为：A上的正方形比B上的正方形如同C的平方数比D的平方数，

A上的正方形比B上的正方形如同A与B的二次比，且C的平方数与D的平方数的比如同C与D的二次比，

所以：A比B如同C比D，

那么：A与B之比如同数C与数D，

所以：A与B是长度可公度的。[X. 6]

设：A与B是长度不可公度的。

那么可以说：A上的正方形与B上的正方形之比不同于一个平方数比

一个平方数。

因为：假如A上的正方形与B上的正方形之比如同一个平方数比一个平方数，

那么：A与B是可公度的。

但这并不符合实际。

因此：A上的正方形与B上的正方形之比不同于一个平方数比一个平方数。

再设：A上的正方形与B上的正方形之比不同于一个平方数比一个平方数。

那么可以说：A比B是长度不可公度的。

因为：假如A与B是可以公度的，

那么：A上的正方形与B上的正方形之比如同一个平方数比一个平方数。

但这并不符合实际。

因此：A与B不是长度可公度的。

证完。

推论　从证明中可得，长度可公度的两线段也总是正方形可公度的，但是正方形可公度的线段不一定是长度可公度的。

引理 两相似面数之比如同一个平方数比一个平方数。[VIII. 26]

倘若两数之比如同一个平方数比一个平方数，那么它们是相似面数。[VII. 26的逆命题]

如果数不是相似面数，那么这些不与它们的边成比例的数，它们之比不同于一个平方数比一个平方数。

因为，假如它们有这样的比，它们就是相似面数，这与假设矛盾。

因此：不是相似面数的数之比不同于一个平方数比一个平方数。

命题10

…

求一个给定的线段不可公度的两条线段，一个是仅长度不可公度，另一个也在正方形上与之不可公度。

A

D

E

B

C

设：已给定线段A，

要求：找出与A不可公度的两线段，一个是仅长度不可公度，一个是也在正方形上与之不可公度。

取两数B、C，让它们的比不同于一个平方数比一个平方数，也就是

它们不是相似面数。

设：B比C如同A上的正方形比D上的正方形，[X. 6，推论]

因此：A上的正方形与D上的正方形可公度。[X. 6]

因为：B与C的比不同于一个平方数比一个平方数，

所以：A上的正方形比D上的正方形也不同于一个平方数比一个平方数，

因此：A与D的长度不可公度。[X. 9]

设：E是A、D的比例中项，

因此：A比D如同A上的正方形比E上的正方形。[V. 定义9]

因为：A与D是长度不可公度，

那么：A上的正方形与E上的正方形也是不可公度的，[X. 8]

因此：A与E是正方形上与之不可公度的，

因此：求出了与指定线段A不可公度的两线段D，E，

D是仅长度上不可公度，E是在长度与正方形上都不可公度。

证完。

命题11

…

假如四个量成比例，且第一量与第二量是可公度的，那么第三量与第四量也是可公度的。假如第一量与第二量是不可公度的，那么第三量与第四量也是不可公度的。

A

B

C

D

设：有四个成比例的量A、B、C、D。

其中A比B如同C比D。

设：A与B是可公度的。

那么可以说：C与D也是可公度的。

因为：A与B是可公度的，

所以：A与B之比如同一个数比一个数。[X. 5]

因为：A比B如同C比D，

所以：C与D之比如同一个数比另一个数，

因此：C与D是可公度的。[X. 6]

设：A与B是不可公度的。

那么可以说：C与D也是不可公度的。

因为：A与B不可公度，

所以：A与B之比不同于一个数比另一个数。[X. 7]

因为：A比B如同C比D，

所以：C与D之比不同于一个数比一个数，

因此：C与D不可公度。[X. 8]

证完。

命题12

…

与同一量可公度的两量，彼此也可公度。

A B C D E H F K G L

设：量A、B的每一个与C可公度。

那么可以说：A与B也是可公度的。

因为：A与C可公度。

因此：A与C之比如同一个数比一个数。[X. 5]

设：这个比是D比E。

又因：C与B可公度，

那么：C与B之比如同一个数比一个数，[X. 5]

设：这个比是F比G，

那么：对已知一些相比中的数，也就是D比E及F比G。

取数H、K、L，使它们成为已知比成连比例，[参看VIII. 4]

也就是D比E如同H比K，且F比G如同K比L。

因为：A比C如同D比E，

且D比E如同H比K，

又因：C比B如同F比G，且F比G如同K比L，

且A比C如同H比K，

因此，取首末比：A比B如同H比L，

那么：A与B之比如同一个数比一个数，

因此：A与B是可公度的。

命题13

…

如果两个量是可公度的，若其中一量与某量不可公度，则另一量也与此不可公度。

A ———————————

C ———————————

B ——————————————

设：有两个可公度的量A、B，且其中的一量A与另一量C是不可公度的。

那么可以说：B与C也不可公度。

因为：若B与C是可公度的，且A与B也是可公度的，

那么：A与C也是可公度的。[X. 12]

又因：A与C也是不可公度的，

这是不符合实际的，

因此：B与C不是可公度的，

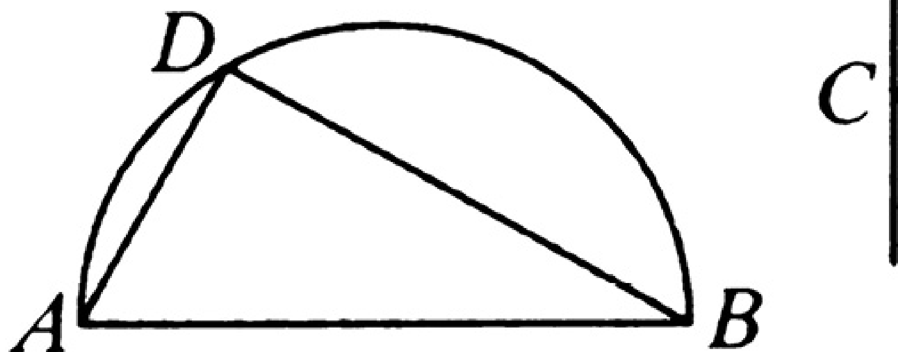
所以：B与C是不可公度的。

证完。

引理

…

求作一线段，使得这线段上的正方形等于给定的大小不等的两线段上的正方形的差。



设：已知有两条不等线段*AB*、*C*，而*AB*是大线段。

要求：作一正方形，使得等于*AB*上的正方形超过*C*上的正方形所得之差。

设：以*AB*为直径作半圆，在半圆上作弦*AD*等于*C*，连接*DB*。[IV. 1]

因为：角*ADE*是直角，[III. 31]

所以：*AB*上的正方形与*AD*上的正方形之差为*DB*上的正方形。[I. 47]

同理：假如已知两线段，可以用同样的方法求出一条线段，使得这线段上的正方形等于两已知线段上的正方形的和。

设：*AD*、*BD*是两条已知线段，

要求：作一线段，使它上的正方形等于*AD*与*BD*上两正方形的和。

设：用*AD*、*DB*组成一个直角，连接*AB*。

那么：*AB*上的正方形等于*AD*、*DB*上两正方形的和。

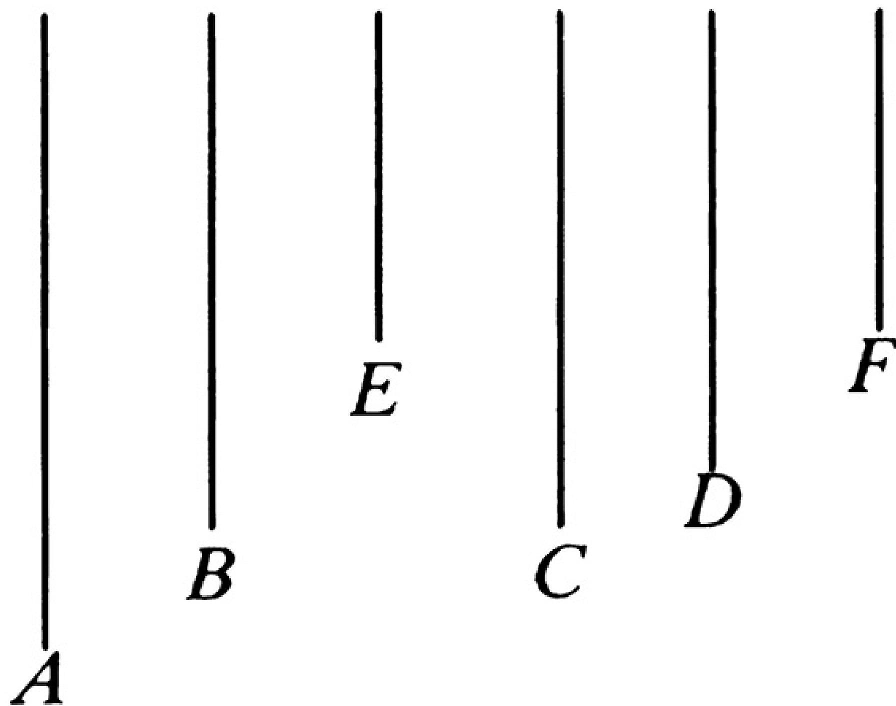
证完。

命题14

…

若有四条线段成比例，第一条线段上的正方形比第二条线段上的正方形超过一条线段上的正方形，这条线段与第一条线段是可公度的，那么第三条线段上的正方形也比第四条线段上的正方形超过一条线段上的正方形，这条线段与第三条线段也可公度。

若第一条上的正方形比第二条上的正方形超过一条线段上的正方形，这条线段与第一条线段是不可公度的，那么第三条上的正方形也比第四条上的正方形超过一条线段上的正方形，这条线段与第三条也不可公度。



设：有四条成比例的线段A、B、C、D。

其中，A比B如同C比D，且A上的正方形与B上的正方形之差等于E上的正方形；而C上的正方形与D上的正方形之差等于F上的正方形。

那么可以说：如果A与E可公度，那么C与F也可以公度；

如果A与E不可公度，那么C与F也不可公度。

因为：A比B如同C比D，

所以：A上的正方形比B上的正方形如同C上的正方形比D上的正方形。[VI. 22]

因为：E、B上的正方形之和等于A上的正方形，

而D、F上的正方形之和等于C上的正方形，

所以：E、B上的正方形之和比B上的正方形如同D、F上的正方形之和比D上的正方形。

那么，由分比：E上的正方形比B上的正方形如同F上的正方形比D上的正方形，[V. 17]

因此：E比B如同F比D，[VI. 22]

所以，由反比：B比E如同D比F。

因为：A比B如同C比D，

那么，取首末比例：A比E如同C比F，[V. 22]

因此：若A与E可公度，那么C与F也可公度，

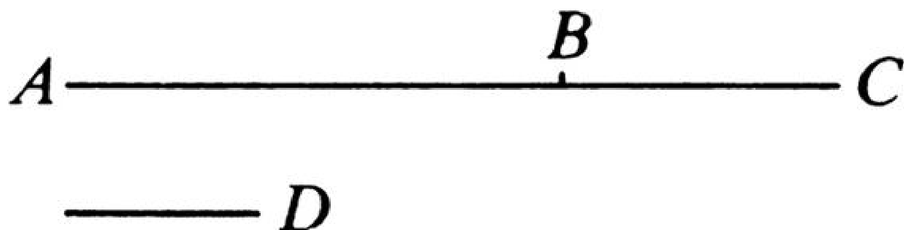
若A与E不可公度，那么C与F也不可公度。

证完。

命题15

…

假如把两个可公度的量相加，它们的和也与原来两个量都可公度；倘若两个量的和与两个量的其中一个可以公度，那么原来两个量也可以公度。



设：AB、BC是两个可公度的量，将AB、BC相加。

那么可以说：整体AC也与AB、BC每一个可公度。

因为：AB、BC是可公度的，

所以：一定有个量能量尽它们。

设：D可以量尽AB、BC。

因为：D量尽AB、BC，

所以：它也量尽整体AC。

因为：它也量尽AB、BC，

所以：D量尽AB、BC、AC，

因此：AC与AB、BC的每一个是可公度的。[X. 定义1]

又设：AC与AB是可公度的。

那么可以说：AB、BC也是可公度的。

因为：AC、AB是可公度的，

那么：有一个量能量尽它们，设D可以量尽它们。

因为：D量尽CA、AB，

所以：它也能量尽余量BC。

又因：它也量尽AB，

所以：D也量尽AB、BC，

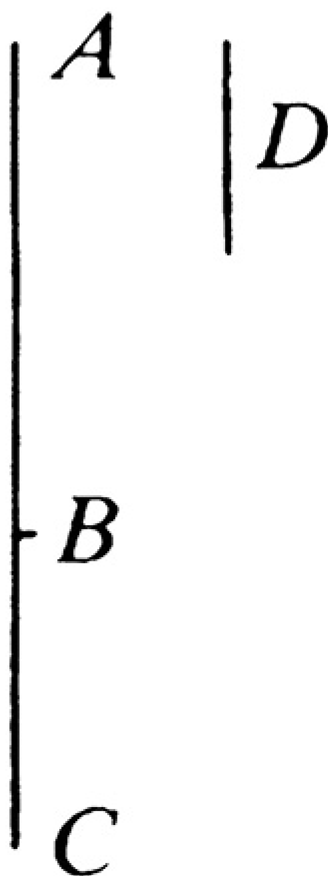
因此：AB、BC是可公度的。[X. 定义1]

证完。

命题16

…

若把两个不可公度的量相加，它们的和一定与原来两个量都不可公度；若两个量之和与两个量之一不可公度，那么两个量也不可公度。



设：AB、BC是不可公度的两个量，将它们相加。

那么可以说：AC与AB、BC都不可公度。

设：CA、AB可以公度，D可以量尽它们。

因为：D量尽CA、AB，

所以：它也量尽其他的量BC。

因为：它量尽AB，

所以：D量尽AB、BC，

因此：AB、BC是可公度的。

又，根据假设：AB、BC是不可公度的。

这并不符合假设。

所以：没有一个量能量尽CA、AB，

因此：CA、AB是不可公度的。[X. 定义1]

同理可证：AC、CB也是不可公度的，

所以：AC与AB、BC的每一个不可公度。

又设：AC与两量AB、BC之一不可公度。

先设：AC与AB不可公度。

那么可以说：AB、BC也不可公度。

设：它们是公度的，D能量尽它们。

因为：D量尽AB、BC，

所以：D也量尽整体AC。

因为：它也量尽AB，

所以：*D*量尽*CA*、*AB*，

所以：*CA*、*AB*是可公度的。

又，根据假设：它们是不可公度的。

这与假设不符。

因此：没有一个量能量尽*AB*、*BC*，

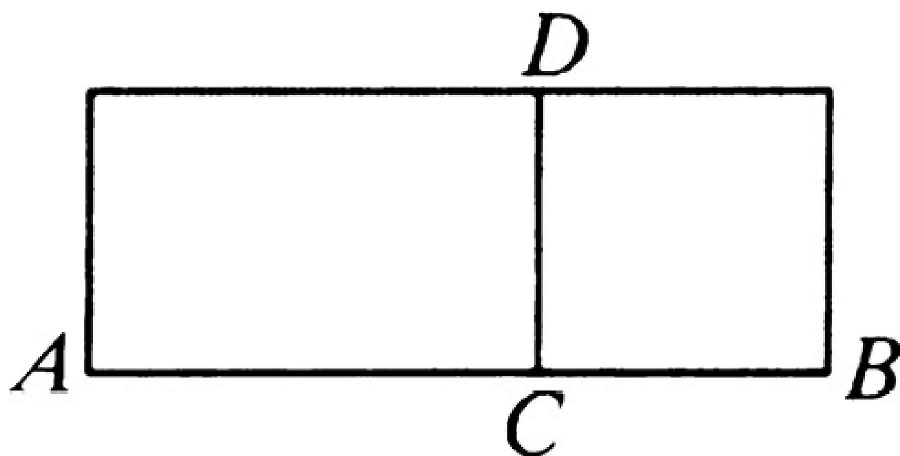
所以：*AB*、*BC*是不可公度的。[X. 定义1]

证完。

引理

…

假如在一条线段上贴合上一个缺少正方形的矩形，那么这个矩形等于因作图而把原线段分成两段围成的矩形。



设：在线段*AB*上贴合一个缺少正方形*DB*的矩形*AD*。

那么可以说：*AD*等于以*AC*、*CB*为边的矩形。

因为：*DB*是正方形，*DC*等于*CB*，且*AD*是矩形*AC*、*CD*，也就是矩

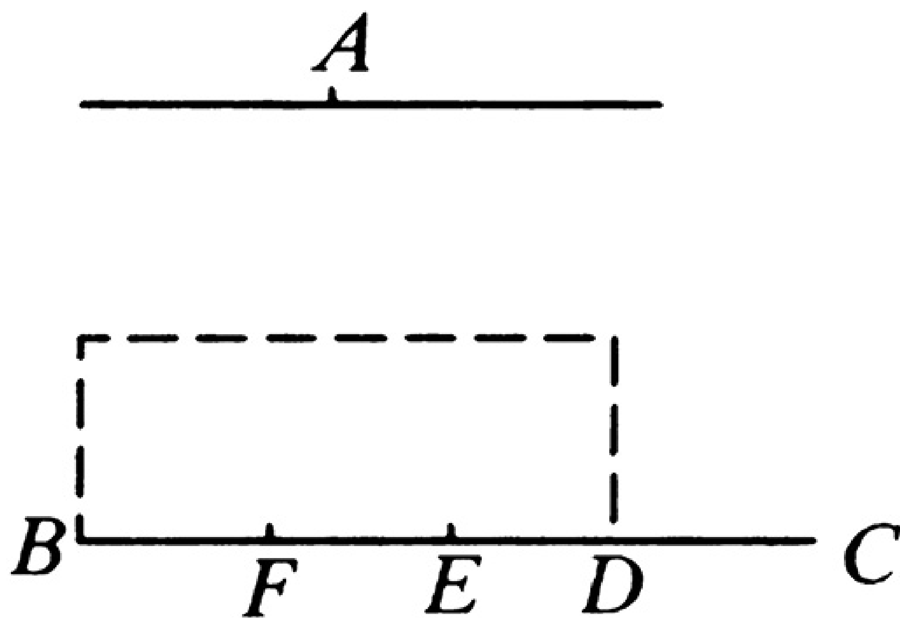
形AC、CB。

命题17

…

假如有两条不相等的线段，在大线段贴合上一个矩形等于小线段上的正方形的四分之一而缺少一个正方形，而大线段被分成长度可公度的两部分，那么原来大线段上的正方形比小线段上的正方形大一个与大线段是可公度的线段上的正方形。

假如大线段上的正方形比小线段上的正方形大一个与大线段是可公度的线段上的正方形，并在大线段贴合上一个矩形等于小线段上的正方形的四分之一，且缺少一个正方形，那么大线段被分成的两部分是长度可公度的。



设：有两个不相等的线段A、BC，其中BC是较大者。

在BC上贴合一个矩形等于A上的正方形的四分之一，也就是等于A的一半上的正方形，并缺少一个正方形。

设：所缺少的正方形是*BD*、*CD*，并且*BD*与*CD*的长度可公度。

那么可以说：*BC*上的正方形比*A*上的正方形大一个与*BC*是可公度的线段上的正方形。

那么：平分*BC*于点*E*，取*EF*等于*DE*。

因此：余量*DC*等于*BF*。

因为：线段*BC*被点*E*分成相等的两部分，被*D*分为不相等的两部分，

所以：由*BD*、*CD*围成的矩形与*ED*上的正方形的和等于*EC*上的正方形。[II. 5]

因为：把它们四倍后同样如此，

因此：四倍矩形*BD*、*DC*与四倍*DE*上的正方形的和等于*EC*上的正方形的四倍。

因为：*A*上的正方形等于四倍的矩形*BD*、*CD*，

且*DF*上的正方形等于四倍的*DE*上的正方形，*DF*是*DE*的二倍，

又因：*BC*上的正方形等于四倍*EC*上的正方形，这是因为*BC*是*CE*的二倍，

所以：*A*、*DF*上的正方形的和等于*BC*上的正方形，

因此：*BC*上的正方形比*A*上的正方形大一个*DF*上的正方形。

接下来可以证明：*BC*与*DF*也是可公度的。

因为：*BD*与*DC*是长度可公度的，

所以：*BC*与*CD*也是长度可公度的。[X. 15]

又因：*CD*等于*BF*，[X. 6]

所以：CD与BF的和是长度可公度的，

所以：BC与BF、CD的和也是长度可公度的，[X. 12]

因此：BC与余量FD也是长度可公度的，[X. 15]

因而：BC上的正方形比A上的正方形大一个与BC是可公度的线段上的正方形。

设：BC上的正方形比A上的正方形大一个与BC是可公度的线段上的正方形，在线段BC上贴合一个矩形，等于A上的正方形的四分之一，并缺少一个正方形，设它是矩形BD、DC。

那么可以说：BD与DC是长度可公度的。

同理可证：BC上的正方形比A上的正方形大一个FD上的正方形。

因为：BC上的正方形比A上的正方形大一个与BC是可公度的线段上的正方形，

所以：BC与FD是长度可公度的，

因此：BC与余量BF、DC的和也是长度可公度的。[X. 5]

因为：BF、DC之和与DC可公度，[X. 6]

所以：BC与CD也是长度可公度的，[X. 12]

那么，由分比：BD与DC是长度可公度的。[X. 15]

证完。

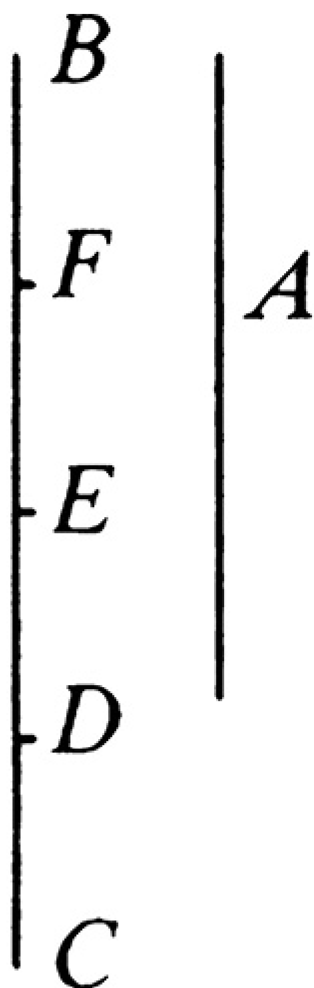
命题18

…

如果有两条不相等的线段，在大线段贴合上一个等于小线段上的正方形四分之一并缺少一个正方形的矩形，假如分大线段为不可公度的两部

分，那么原来大线段上的正方形比小线段上的正方形大一个与大线段不可公度的线段上的正方形。

假如大线段上的正方形比小线段上的正方形大一个与线段不可公度的线段上的正方形，而在大线段贴合上等于小线段上的正方形的四分之一，并缺少一个正方形的矩形，那么大线段被分为不可公度的两部分。



设：有两条不相等的线段A、BC，其中BC是较大者；

在BC贴合上等于A上的正方形的四分之一，并缺少一个正方形的矩形，设矩形是BD、DC。[参看X. 17前引理]

并且BD与DC的长度不可公度。

那么可以说：*BC*上的正方形较*A*上的正方形大一个与*BC*是不可公度的线段上的正方形。

用前面的作图，同理可证：*BC*上的正方形比*A*上的正方形大一个*FD*上的正方形，

求证：*BC*与*DF*是长度不可公度的。

因为：*BD*与*DC*是长度不可公度的，

所以：*BC*与*CD*在长度上是不可公度的。[X. 16]

因为：*DC*与*BF*、*DC*的和是可公度的，[X. 6]

因此：*BC*与*BF*、*DC*的和是不可公度的，[X. 13]

所以：*BC*与余量*FD*在长度上也是不可公度的。[X. 16]

因为：*BC*上的正方形比*A*上的正方形大一个*FD*上的正方形，

所以：*BC*上的正方形比*A*上的正方形大一个与*BC*是不可公度的线段上的正方形。

设：*BC*上的正方形比*A*上的正方形大一个与*BC*是不可公度的线段上的正方形；

且对*BC*贴合上等于*A*上的正方形的四分之一，并缺少一个正方形的矩形，

它就是矩形*BD*、*DC*。

求证：*BD*与*DC*是长度不可公度的。

用前作图，同理可证：*BC*上的正方形较*A*上的正方形大一个*FD*上的正方形。

因为：*BC*上的正方形比*A*上的正方形大一个与*BC*是不可公度的线段上的正方形，

所以：BC与FD是长度不可公度的，

因此：BC与余量，也就是BF、DC的和是不可公度的。[X. 16]

又因：BF、DC的和与DC是长度可公度的，[X. 6]

因此：BC与DC也是长度可公度的，[X. 13]

所以，由分比：BD与DC是长度不可公度的。[X. 16]

证完。

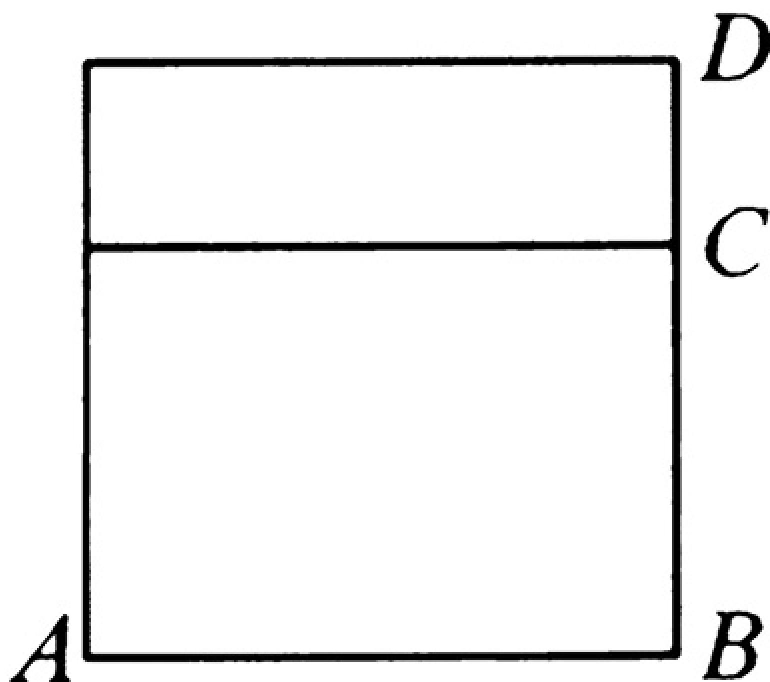
引理 已经证明，长度可公度的线段也总是正方可公度的。然而，因为正方可公度的线段不一定是长度可公度的，那么它必然是长度可公度的，要么是不可公度的。假如一条线段与一个已知有理线段是长度可公度的，那么称它为有理的。并且与已知有理线段不仅是长度也是正方可公度，因为凡线段长度可公度，也必然是正方形可公度的。

因为任一线段与已知的有理线段是正方可公度的，也是长度可公度的，在这种情况下也可以称它为有理的。并且是长度和正方两者都可以公度的；然而，若任一线段与一有理线段是正方可公度的，并且是长度不可公度的，在这种情况下也称它是有理的，但是仅正方可公度。

命题19

…

由长度可公度的两条有理线段围成的矩形是有理的。



设：矩形*AC*是以长度可公度的有理线段*AB*、*BC*围成的，

那么可以说：*AC*是有理的。

因为：可以在*AB*上作一个正方形*AD*，

所以：*AD*是有理的。[X. 定义4]

因为：*AB*与*BC*是长度可公度的，而*AB*等于*BD*，

所以：*BD*与*BC*是长度可公度的。

因为：*BD*比*BC*如同*DA*比*AC*，[VI. 1]

所以：*DA*与*AC*是可公度的。[X. 11]

因为：*DA*是有理的，

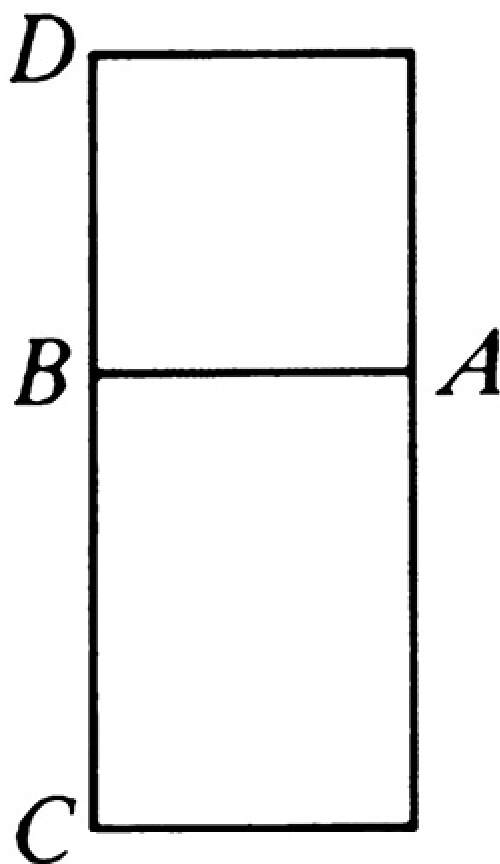
所以：*AC*也是有理的。[X. 定义4]

证完。

命题20

…

假如在一条有理线段贴合上一个有理面，那么产生作为宽的线段是有理的，并与原线段是长度可公度的。



假如：用前面的方法，在有理线段AB贴合上一个有理矩形AC，产生的BC为宽。

那么可以说：BC是有理的，并且与BA是长度可公度的。

因为：在AB上画出一个正方形AD，

所以：AD是有理的。[X. 定义4]

因为：AC也是有理的，

所以：DA与AC是可公度的。

因为：DA比AC如同DB比BC，[VI. 1]

所以：DB与BC也是公度的。[X. 11]

因为：DB等于BA，

所以：AB与BC也是可公度的。

因为：AB是有理的，

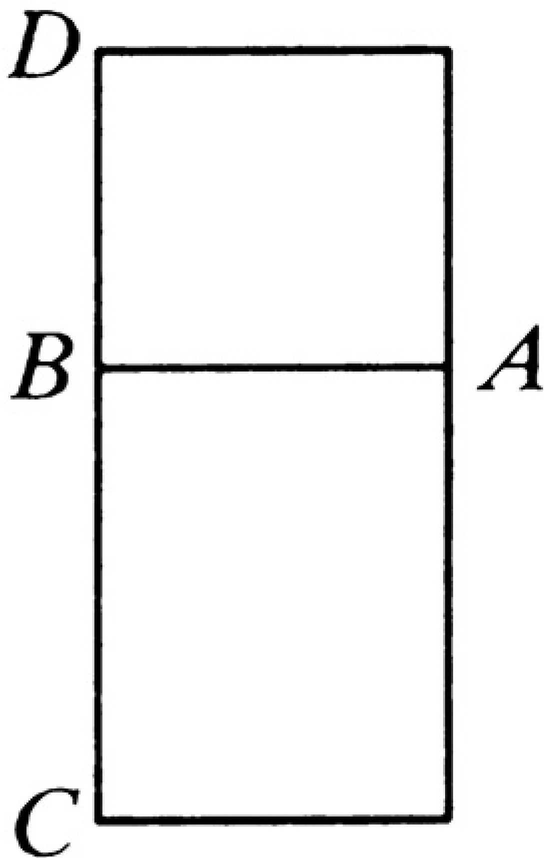
所以：BC也是有理的，与AB是长度可公度的。

证完。

命题21

…

由仅是正方可公度的两条有理线段围成的矩形是无理的，并于此矩形相等的正方形的边也是无理的，那么称后者为中项线。



设：矩形AC是由仅正方可公度的两有理线段AB、BC围成的。

那么可以说：矩形AC是无理的，并与AC相等的正方形也是无理的，我们把后者称为中项线。

在AB上作正方形AD，[X. 定义4]

那么：AD是有理的。

由已知，设：AB、BC仅是正方可公度，

所以：AB与BC是长度不可公度的。

因为：AB等于BD，

所以：DB与BC也是长度不可公度的。

因为：DB比BC如同AD比AC，[VI. 1]

所以：DA与AC是不可公度的。[X. 11]

因为：DA是有理的，

所以：AC是无理的，

因此：等于AC的正方形的边也是无理的，[X. 定义4]

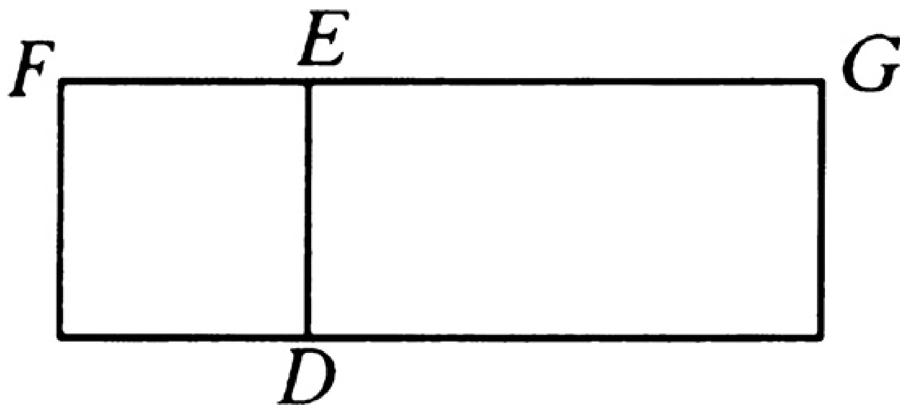
所以：称后者为中项线。

证完。

引理

…

假如有两条线段，第一线段比第二线段如同第一条线段上的正方形比以这两条线段围成的矩形。



设：有两条线段FE、EG。

那么可以说：FE比EG如同FE上的正方形比矩形FE、EG。

设：在FE上画正方形DF，作矩形GD。

因为：FE比EG如同FD比DG，[VI. 1]

并且FD是FE上的正方形，DG是矩形DE、EG，也就是矩形FE、EG，

所以：FE比EG如同FE上的正方形比矩形FE、EG。

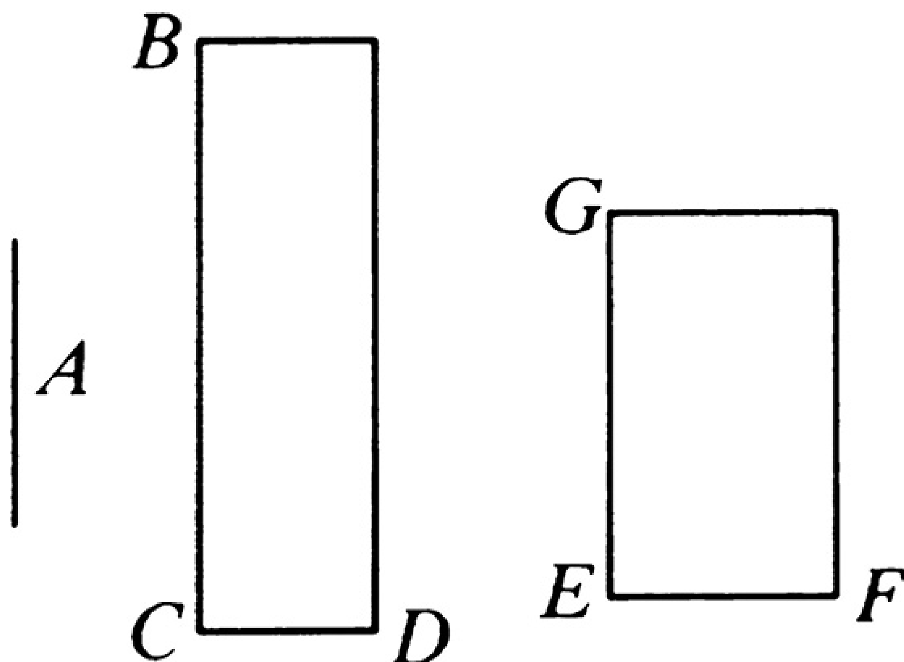
同理：矩形GE、EF比EF上的正方形，也就是GD比FD如同GE比EF。

证完。

命题22

…

假如对一条有理线段贴合上一个与中项线上的正方形相等的矩形，那么产生出作为宽的线段是有理的，并于原有理线段是长度不可公度的。



设：有中项线A，有理线段CB，又在BC上贴合一矩形BD等于A上的正方形，产生出作为宽的CD。

那么可以说：CD是有理的，并与CB是长度不可公度的。

因为：A是中项线，

所以：A上的正方形等于仅是正方可公度的两条有理线段围成的矩形。[X. 21]

设：A上的正方形等于矩形GF。

因为：A上的正方形等于BD，

所以：BD等于GF。

因为：BD与GF也是等角的，在相等且等角的两个矩形中，夹等角的两边成反比例，[VI. 14]

那么，有比例：BC与EG如同EF比CD，

所以：BC上的正方形比EG上的正方形如同EF上的正方形比CD上的正方形。[VI. 22]

因为：CB、EC的每一个是有理的，

所以：CB上的正方形与EG上的正方形是可公度的，

因此：EF上的正方形与CD上的正方形也是可公度的。[X. 11]

因为：EF上的正方形是有理的，

所以：CD上的正方形也是有理的，[X. 定义4]

因此：CD是有理的。

因为：EF与FG是仅正方可公度的，也就是它们的长度不可公度，

且EF比EG如同EF上的正方形比矩形FE、EG，[引理]

因此：EF上的正方形与矩形FE、EG是不可公度的。[X. 11]

又因：CD、EF在正方形上是有理的，

所以：CD上的正方形与EF上的正方形是可公度的，

那么：矩形DC、CB与矩形FE、EG都等于A上的正方形，

因此：它们是可公度的，

因此：CD上的正方形与矩形DC、CB也是不可公度的。[X. 13]

因为：CD上的正方形比矩形DC、CB如同DC比CB，[引理]

所以：DC与CB是长度不可公度的，[X. 11]

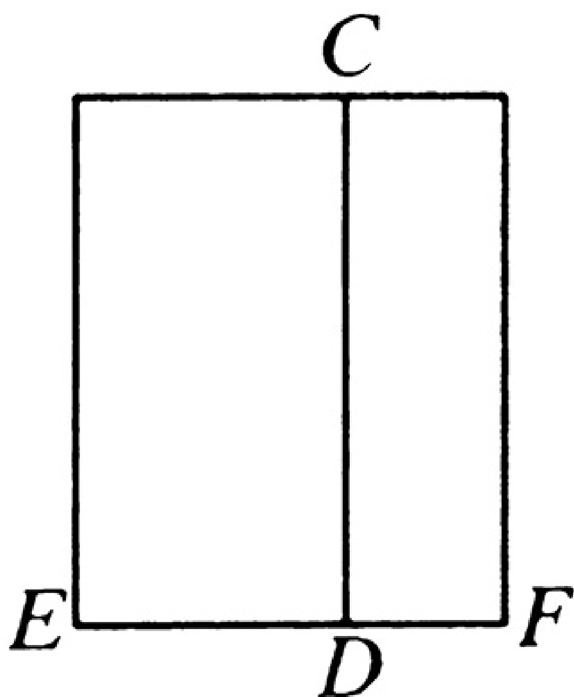
因此：CD是有理的，与CB是长度不可公度的。

证完。

命题23

…

与中项线可公度的线段也是中项线。



设：A是中项线，且A与B是可公度的。

那么可以说：B也是中项线。

设：给定有理线段CD，在CD贴合一个矩形CE，使它等于A上的正方形，产生出ED作为宽，

因此：ED是有理的，且与CD长度不可公度。

在CD贴合上一个矩形CF，使它等于B上的正方形，产生出DF作为宽。

因为：A与B是可公度的，

所以：A上的正方形与B上的正方形也是可公度的。

又因：EC等于A上的正方形，CF等于B上的正方形，

所以：两矩形EC与CF是可公度的。

因为：EC比CF如同ED比DF；[VI. 1]

所以：ED与DF是长度可公度的。[X. 11]

因为：ED是有理的，与DC是长度不可公度的，

所以：DF也是有理的。[X. 定义3]

因为：与DC是长度不可公度的，[X. 13]

所以：CD、DF都是有理的，仅正方可公度。

因为：一条线段上的正方形等于以仅正方可公度的两条有理线段围成的矩形，那么此线段是中项线，[X. 21]

所以：与矩形CD、DF相等的正方形边是中项线。

因为：B是与矩形CD、DF相等的正方形的边，

所以：B是中项线。

证完。

推论 由此可见，与中项面可公度的面是中项面。

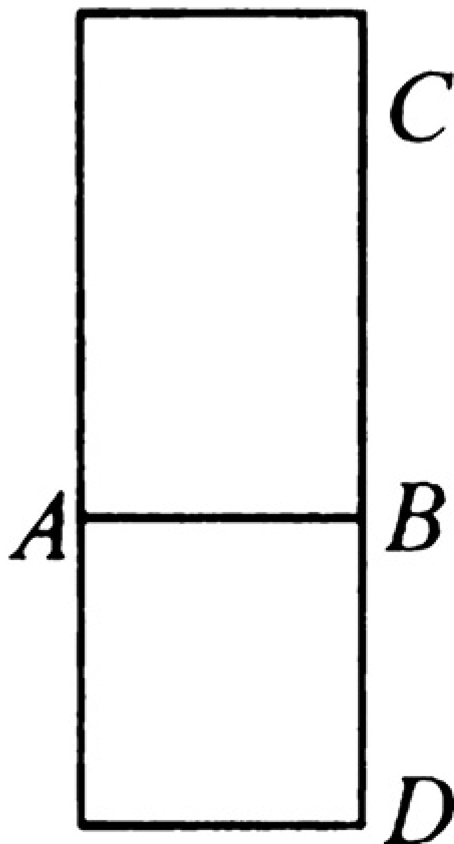
关于中项面，在有理的情况下，用同样的方法可以解释如下[X. 18之后的引理]，与一中项线是长度可公度的线段称为中项线，不仅是长度也是正方可公度的，因为，在一般情况下，线段是长度可公度必然是正方可公度。

但是，假如一些线段与中项线是正方可公度的，也是长度可公度的，那么称这些线段是长度且正方可公度的中项线。但是假如是仅正方可公度，那么称它们是仅正方可公度的中项线。

命题24

…

由长度可公度的两中项线围成的矩形是中项面。



设：长度可公度的两中项线*AB*、*BC*围成了矩形*AC*。

那么可以说：*AC*是中项面。

设：在*AB*上作一正方形*AD*，那么*AD*是中项面。

因为：*AB*与*BC*是长度可公度的，那么*AB*等于*BD*，

所以：*DB*与*BC*是长度可公度的，

因此：*DA*与*AC*也是可公度的面。[VI. I，X. 11]

又因：DA是中项面，

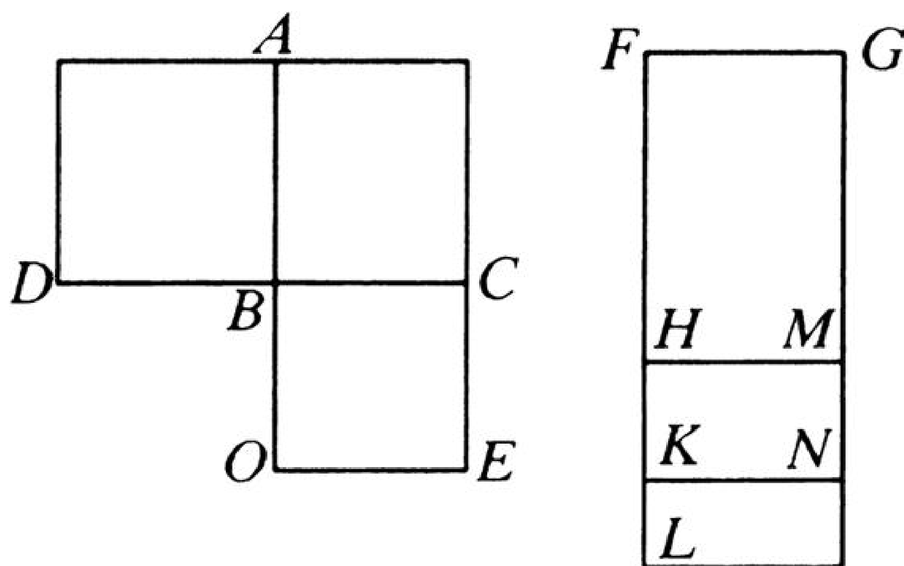
因此：AC也是中项面。[X. 23，推论]

证完。

命题25

…

由仅正方可公度的两中项线围成的矩形或者是有理面或者是中项面。



设：矩形AC是由仅正方可公度的两中项线AB、BC围成的矩形。

那么可以说：AC是有理面或者是中项面。

假如：在AB、BC上分别作出正方形AD、BE，

因此：两正方形AD、BE都是中项面。

设：FG是一个已给定的有理线段，在FG贴合上一个矩形GH等于AD，产生出作为宽的FH，

在HM上贴合一个矩形MK等于AC，产生出作为宽的HK，

同理，在KN上贴合一个矩形NL等于BE，产生出作为宽的KL，

所以：FH、HK、KL在一直线上。

因为：正方形AD、BE每一个都是中项面，且AD等于GH，而BE等于NL，

因此：矩形GH、NL的每一个也是中项面。

因为：它们都是贴合于有理线段FG上的，

因此：线段FH、KL每一个都是有理的，与FG是长度不可公度的。[X. 22]

因为：AD与BE是可公度的，

所以：GH与NL也是可公度的。

因为：GH比NL如同FH比KL，[VI. 1]

因此：FH与KL是长度可公度的，[X. 11]

因此：FH、KL是长度可公度的两有理线段，

因而：矩形FH、KL是有理的。[X. 19]

因为：DE等于BA，OB等于BC，

所以：DB比BC如同AB比BO。

因为：DB比BC如同DA比AC，[VI. 1]

且AB比BO如同AC比CO，

因此：DA比AC如同AC比CO。

因为：AD等于GH，AC等于MK以及CO等于NL，

所以：GH比MK如同MK比NL，

因此：FH比HK如同HK比KL，[VI. 1，V. 11]

因此：矩形FH、KL等于HK上的正方形。[VI. 17]

因为：矩形FH、KL是有理的。

因此：HK上的正方形也是有理的，

所以：HK是有理的。

设：HK与FG是长度可公度的，

因此：HN是有理的。[X. 19]

设：HK与FG是长度不可公度的，

那么：KH、HM是仅正方可公度的两有理线段，

所以：HN是中项面，[X. 21]

因此：HN是有理面或者是中项面。

因为：HN等于AC，

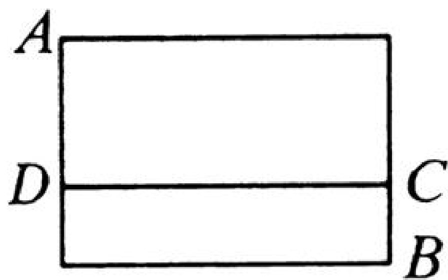
因此：AC是有理面或者是中项面。

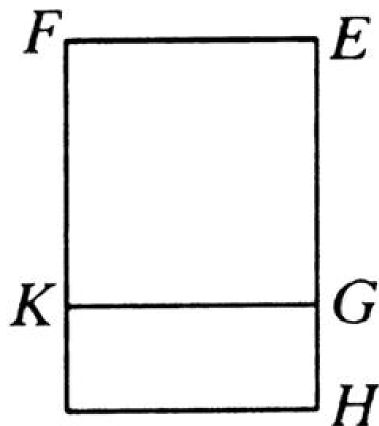
证完。

命题26

…

一个中项面不会比一个中项面大一个有理面。





设：中项面*AB*比中项面*AC*大一个有理面*DB*。

已知有理线段*EF*，在*EF*上贴合一个矩形*FH*等于*AB*，产生出*EH*作为宽。

截出等于*AC*的矩形*FG*，

那么：余量*BD*等于余量*KH*。

因为：*DB*是有理的，

所以：*HK*也是有理的。

因为：矩形*AB*、*AC*每一个都是中项面，且*AB*等于*FH*，且*AC*等于*FC*，

因此：两矩形*FH*、*FG*每一个也都是中项面。

因为：它们都是贴合于有理线段*EF*上，

因此：每条线段*HE*、*EG*都是有理的，且与*EF*是长度不可公度的。[X. 22]

因为：*DB*是有理面且等于*KH*，

所以：*KH*也是有理面，且贴合于有理线段*EF*上，

因此：*GH*是有理的，并与*EF*是长度可公度的。[X. 20]

又因：EG也是有理的，它与EF是长度不可公度的，

因此：EG与GH是长度不可公度的。[X. 13]

因为：EG比GH如同EG上的正方形比矩形EG、GH，

所以：EG上的正方形与矩形EG、GH是不可公度的。[X. 11]

因为：EG、GH上两正方形的和与EG上的正方形都是有理的，

因此：它们是可公度的。

因为：二倍矩形EG、GH是矩形EG、GH的二倍，

所以：它们是可公度的。[X. 6]

因为：EG、GH上两正方形与二倍矩形EG、GH是不可公度的，[X. 13]

因此：EG、GH上两正方形之和加二倍矩形EG、GH，也就是EH上的正方形与EG、GH上两正方形是不可公度的。[X. 16]

因为：EG、GH上两正方形都是有理面，[X. 定义4]

所以：EH上的正方形是无理的。

根据设：它是有理的。

这是互相矛盾的。

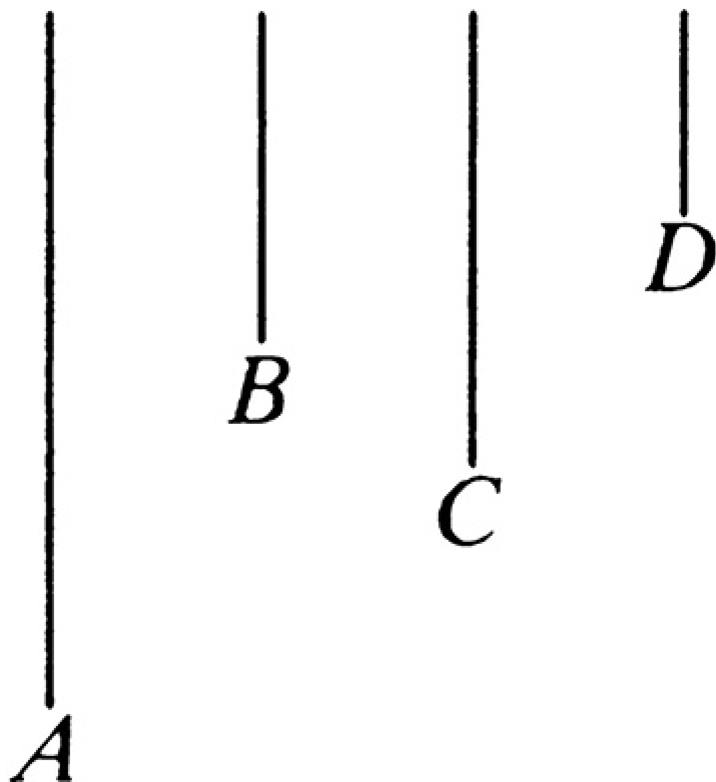
因此：一个中项面不会比一个中项面大一个有理面。

证完。

命题27

…

求仅正方可公度的两种项线，使它们夹一个有理矩形。



设：给定仅正方可公度的两有理线段A和B，取C为A、B的比例中项。[VI. 13]

再设：A比B如同C比D。[VI. 12]

因为：A、B是仅正方可公度的两有理线段，

因此：矩形A、B，也就是C上的正方形，[VI. 17]

是中项面，[X. 21]

因此：C是中项线。[X. 21]

因为：A比B如同C比D、A、B是仅正方可公度的，

所以：C、D也是仅正方可公度的。[X. 11]

因为：C是中项线，

因此：D也是中项线。[X. 23，附注]

因为：C、D是仅正方可公度的两中项线。

可以证明：它们围成的矩形是一个有理面。

因为：A比B如同C比D，

由更比：A比C如同B比D。[V. 16]

因为：A比C如同C比B，

所以：C比B如同B比D，

因此：矩形C、D等于B上的正方形。

因为：B上的正方形是有理的，

因此：矩形C、D也是有理的，

所以：求出了仅正方可公度的两中项线，它们所夹的是有理矩形。

证完。

命题28

…

求仅正方可公度的两中项线，使它们围成的矩形为中项面。

A ————————

B ————————————　　　　D ————————————

C ————————————————　　E ————————————————

设：A、B、C是给定的仅正方可公度的三条有理线段，

其中D是A、B的比例中项。[VI. 13]

要求作出：线段E，使得B比C如同D比E。[VI. 12]

因为：A、B是仅正方可公度的有理线段，

因此：A、B也就是D上的正方形，[VI. 17]

是中项面，[X. 21]

所以：D是中项线。[X. 21]

因为：B、C是仅正方可公度的，B比C如同D比E，

因此：D、E也是仅正方可公度的。[X. 11]

因为：D是中项线，

因此：E也是中项线，[X. 23 附注]

所以：D、E是仅正方可公度的两中项线。

可以证明：它们围成的矩形是一个中项面。

因为：B比C如同D比E，

因此，由更比：B比D如同C比E。[V. 16]

因为：B比D如同D比A，

所以：D比A如同C比E，

因此：矩形A、C等于矩形D、E。

又因：矩形A、C是中项面，

所以：矩形D、E也是中项面，

所以：求出了仅正方可公度的两中项线，并且它们围成的矩形是中项面。

证完。

引理1

…

试着求出二平方数，让它们的和也是平方数。



设：已知两数*AB*、*BC*，它们要么都是偶数，要么都是奇数。

因为：无论从偶数减去偶数，还是从奇数减去奇数，它们的余数都是偶数，[IX. 24. 26]

所以：余数*AC*是偶数。

设：*AC*被*D*平分，

且由于平方数本身是相似面数，所以*AB*、*BC*要么都是相似面数，要么都是平方数。

因为：*AB*、*BC*的乘积与*CD*的平方相加等于*BD*的平方，[II. 6]

且*AB*、*BC*的乘积是一个平方数，

又，已经证明：两相似面数的乘积是平方数，[IX. 1]

所以：两个平方数，也就是*AB*、*BC*的乘积和*CD*的平方被求出，当它们相加时，得到*BD*的平方。

因为：已经同时求出两个平方数，也就是*BD*上的正方形和*CD*上的正方形，

并且它们的差，也就是*AB*、*BC*的乘积是一个平方数，

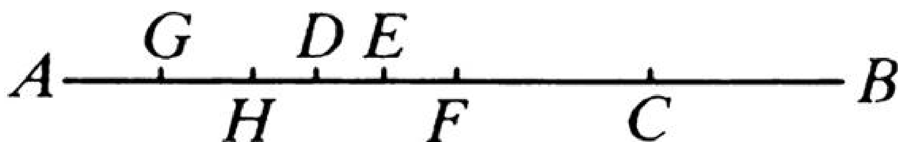
所以：不管*AB*、*BC*是什么样的相似面数，但当它们不是相似面数时，已经求出的两个平方数，也就是*BD*的平方与*BC*的平方，它们的差*AB*、*BC*的乘积不是平方数。

证完。

引理2

…

求二平方数，使其和不是平方数。



设：*AB*、*BC*的乘积是一个平方数，*CA*是偶数，*D*平分*CA*。

此时：*AB*、*BC*的乘积加*CD*的平方等于*BD*的平方。[引理1]

在*BD*上减去单位*DE*。

那么：*AB*、*BC*的乘积加*CE*的平方小于*BD*的平方，

那么可以说：*AB*、*BC*的乘积加*CE*的平方不是平方数。

设：它是平方数。

因为：单位不能再分，

因此：它要么等于*BE*的平方，要么不小于*BE*的平方。

先设：*AB*、*BC*的乘积与*CE*的平方的和等于*BE*的平方，且*GA*是单位*DE*的二倍。

因为：*AC*是*CD*的二倍，*AG*是*DE*的二倍，

所以：余数*GC*也是余数*EC*的二倍，

因此：GC被E平分，

所以：GB、BC的乘积加CE的平方等于BE的平方。[II. 6]

根据假设：AB、BC的乘积与CE的平方的和等于BE的平方，

所以：GB、BC的乘积加CE的平方等于AB、BC的乘积与CE的平方的和。

因为：倘若减去共同的CE的平方，就得到AB等于GB，

这是不符合实际的，

因此：AB、BC的乘积与CE的平方的和不等于BE的平方。

接下来可以证明：它不小于BE的平方，

设：它等于BE的平方，且HA是DF的二倍。

因此：HC是CF的二倍，也就是CH在F点被平分。

同理：HB、BC的乘积加FC的平方等于BF的平方。[II. 6]

根据假设：AB、BC的乘积与CE的平方的和等于BF的平方，

所以：HB、BC的乘积加CF的平方等于AB、BC的乘积加CE的平方。

这是不符合实际的。

所以：AB、BC的乘积加CE的平方不小于BE的平方。

由于已经证明：它不等于BE的平方，

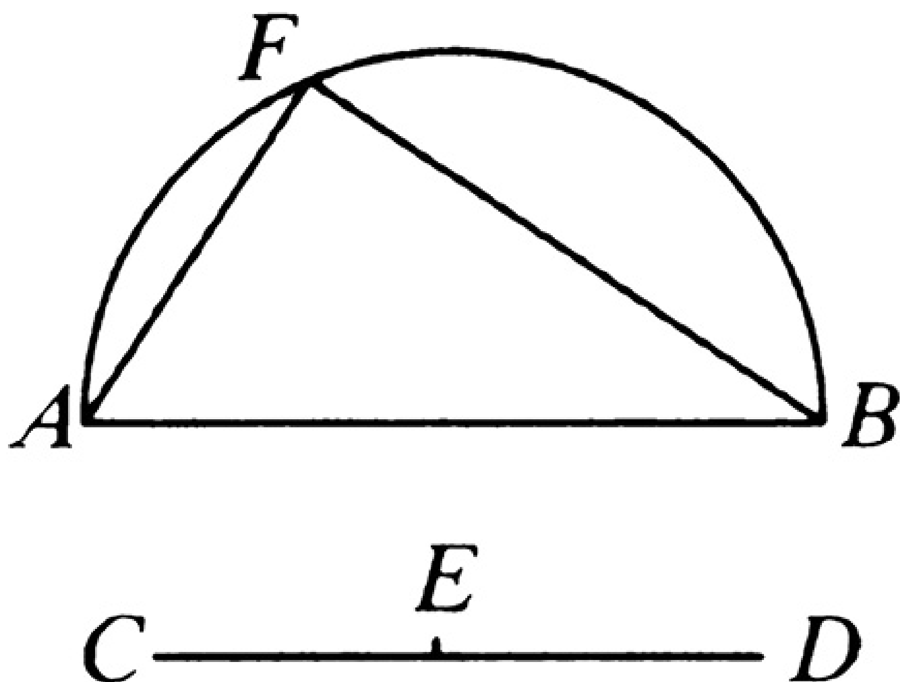
因此：AB、BC的乘积加CE的平方不是平方数。

证完。

命题29

…

求仅正方可公度的二有理线段，并且使大线段上的正方形比小线段上的正方形大一个与大线段是长度可公度的线段上的正方形。



设：有理线段AB及两平方数CD、DE，使得它们的差CE不是平方数。[引理1]

在AB上画出半圆AFB，并找出圆弧上的点F，使DC比CE如同BA上的正方形比AF上的正方形。[X. 6，推论]

连接FB。

因为：BA上的正方形比AF上的正方形如同DC比CE，

所以：BA上的正方形与AF上的正方形的比如同数DC与数CE的比，

因此：BA上的正方形与AF上的正方形是可公度的。[X. 6]

因为：AB上的正方形是有理的，[X. 定义4]

所以：AF上的正方形也是有理的，[X. 定义4]

因此：AF也是有理的。

因为：DC与CE的比不同于一个平方数与另一个平方数的比，

所以：BA上的正方形与AF上的正方形的比也不同于一个平方数与另一个平方数的比，

因此：AB与AF是长度不可公度的，[X. 9]

因此：BA、AF是仅正方可公度的两有理线段。

因为：DC比CE如同BA上的正方形比AF上的正方形，

因此，由换比：CD比DE如同AB上的正方形比BF上的正方形。[V. 19，推论，III. 31，I. 47]

因为：CD比DE如同两平方数之比，

所以：AB上的正方形与BF上的正方形的比如同一个平方数与另一个平方数之比，

因此：AB与BF是长度可公度的。[X. 9]

因为：AB上的正方形等于AF、FB上的正方形的和，

因此：AB上的正方形比AF上的正方形大一个与AB是可公度的线段BF上的正方形，

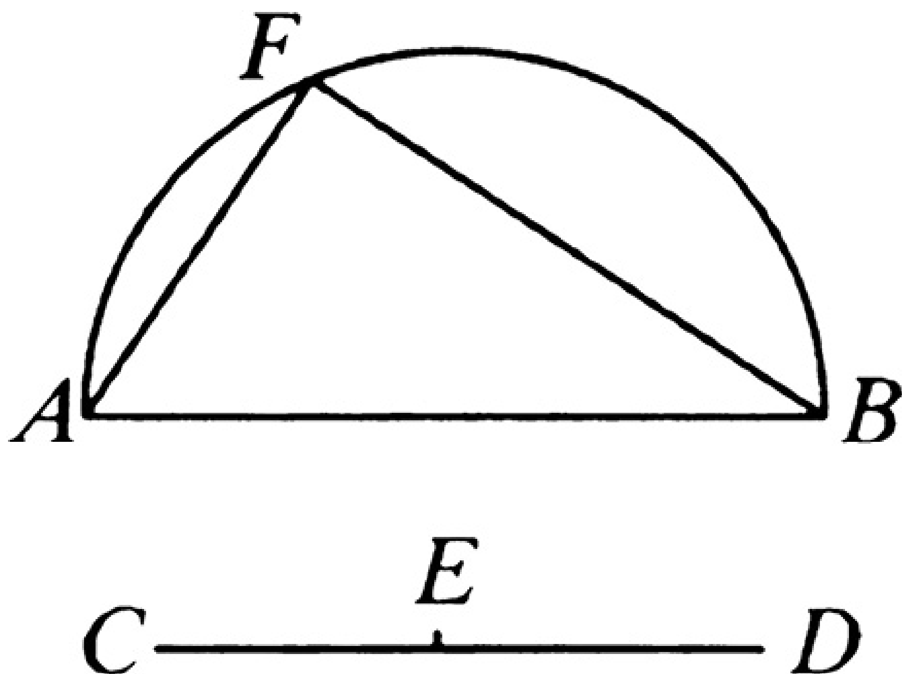
所以：找出了仅正方形可公度的两条有理线段BA、AF，

并且大线段AB上的正方形比小线段AF上的正方形大一个与AB是长度可公度的BF上的正方形。

证完。

命题30

求仅是正方可公度的两有理线段，并且大线段上的正方形比小线段上的正方形大一个与大线段是长度不可公度的线段上的正方形。



设：已知有理线段*AB*及两个平方数*CE*、*ED*，

要求证明：它们的和*CD*不是平方数。[引理2]

设：在*AB*上画出半圆*AFB*，并在圆弧上找出点*F*，使得*DC*比*CE*如同*AB*上的正方形比*AF*上的正方形。[X. 6，推论]

连接*FB*。

同命题29可以证明：*BA*、*AF*是仅正方可公度的两有理线段。

因为：*DC*比*CE*如同*BA*上的正方形比*AF*上的正方形，

因此，由换比：*CD*比*DE*如同*AB*上的正方形比*BF*上的正方形。[V. 19，推论，III. 31，I. 47]

因为：CD与DE的比不同于一个平方数比另一个平方数，

所以：AB上的正方形与BF上的正方形的比也不同于一个平方数比另一个平方数，

因此：AB与BF是长度不可公度的。[X. 9]

因为：AB上的正方形比AF上的正方形大一个与AB是不可公度的FB上的正方形，

因此：AB、AF是仅正方可公度的两有理线段，

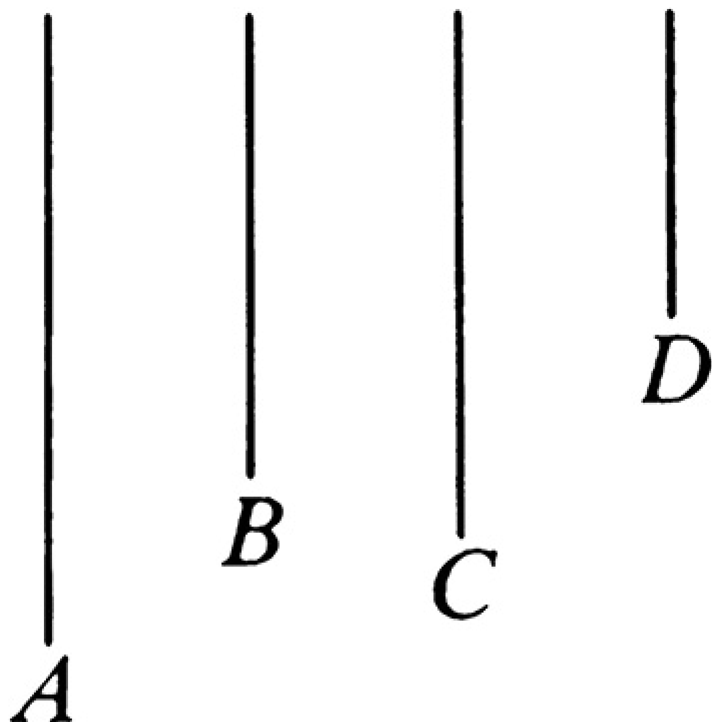
并且AB上的正方形比AF上的正方形大一个与AB是不可公度的FB上的正方形。

证完。

命题31

…

求仅正方可公度的两种项线围成一个有理矩形，使得大线段上的正方形比小线段上正方大一个与大线段是长度可公度的一条线段上的正方形。



设：A、B是已知仅正方可公度的两条有理线段，

使得大线段A上的正方形比B上的正方形大一个与A是长度可公度的一条线段上的正方形。[X. 29]

设：C上的正方形等于矩形A、B，

因此：矩形A、B是中项面，[X. 21]

所以：C上的正方形也是中项面，

因此：C也是中项线。

设：矩形C、D等于B上的正方形。

因为：B上的正方形是有理的，

所以：矩形C、D也是有理的。

因为：A比B如同矩形A、B比B上的正方形，

且C上的正方形等于矩形A、B；矩形C、D等于B上的正方形，

所以：A比B如同C上的正方形比矩形C、D。

因为：C上的正方形比矩形C、D如同C比D，

因此：A比B如同C比D。

因为：A与B是仅正方可公度的，

因此：C与D也是仅正方可公度的。[X. 11]

因为：C是中项线，

所以：D也是中项线。[X. 23，附注]

因为：A比B如同C比D，

且A上的正方形比B上的正方形大一个与A是可公度的线段上的正方形，

因此：C上的正方形比D上的正方形大一个与C是可公度的线段上的正方形，[X. 14]

因此：已经找出仅正方可公度的两中项线C、D。

因为它们围成的矩形是有理的，并且C上的正方形比D上的正方形大一个与C是长度可公度的线段上的正方形。

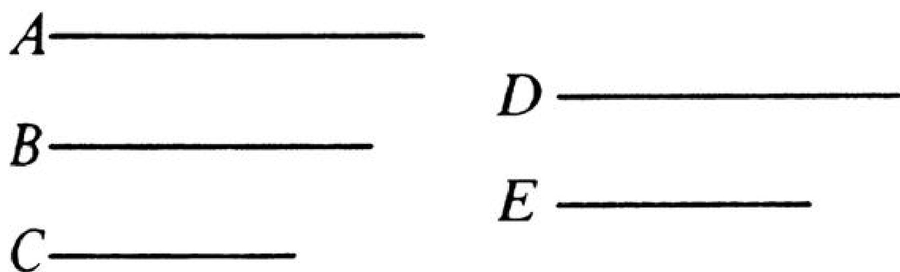
同理可证：当A上的正方形比B上的正方形大一个与A是不可公度线段上的正方形时，那么C上的正方形比D上正方大一个与C也不可公度的线段上的正方形。

证完。

命题32

…

求仅正反可公度的两中项线，它们围成一个中项矩形，并且大线段上的正方形比小线段上的正方形大一个与大线段是可公度的线段上的正方形。



设：A、B、C是仅正方可公度的三条有理线段。

使A上的正方形比C上的正方形大一个与A是可公度的线段上的正方形。[X. 29]

又设：D上的正方形等于矩形A、B。

因为：D上的正方形是中项面，

所以：D也是中项线；[X. 21]

设：矩形D、E等于矩形B、C。

因为：矩形A、B比矩形B、C如同A比C，

且D上的正方形等于矩形A、B，矩形D、E等于矩形B、C，

所以：A比C如同D上的正方形比矩形D、E。

因为：D上的正方形比矩形D、E如同D比E，

所以：A比C如同D比E。

因为：A与C是仅正方可公度的，

所以：D与E也是仅正方公度的。[X. 11]

因为：D是中项线，

所以：E也是中项线。[X. 23，附注]

因为：A比C如同D比E，

且A上的正方形比C上的正方形大一个与A是可公度的线段上的正方形，

所以：D上的正方形比E上的正方形大一个与D是可公度的线段上的正方形。[X. 14]

接下来可以证明：矩形D、E也是中项面。

因为：矩形B、C等于矩形D、E，矩形B、C是中项面，

所以：矩形D、E是中项面，[X. 21]

因此：已经求出了仅在正方可公度的两中项线D、E，并且矩形D、E是中项面，以及大线段上的正方形比小线段上的正方形大一个与大线段是可公度的线段上的正方形。

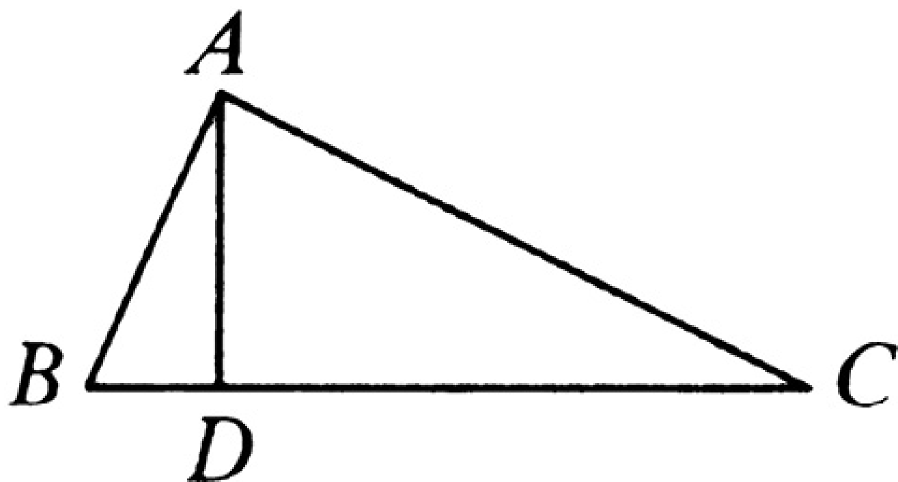
同理可证：当A上的正方形比C上的正方形大一个与A不可公度的线段上的正方形时，那么D上的正方形比E上的正方形大一个与D也是不可公度的线段上的正方形。[X. 30]

证完。

引理

…

设在直角三角形**ABC**中，**A**是直角，**AD**是垂线。



那么可以说：*CB*、*BD*等于*BA*上的正方形，矩形*BC*、*CD*等于*CA*上的正方形，矩形*BD*、*DC*等于*AD*上的正方形，更有矩形*BC*、*AD*等于矩形*BA*、*AC*。

首先证明：矩形*CB*、*BD*等于*BA*上的正方形。

因为：在直角三角形中，*AD*是从直角顶向底边引的垂线，

因此：两三角形*ABD*、*ADC*都相似于三角形*ABC*。[VI. 8]

因为：三角形*ABC*相似于三角形*ABD*，

所以：*CB*比*BA*如同*BA*比*BD*，[VI. 4]

因此：矩形*CB*、*BD*等于*AB*上的正方形。[VI. 17]

同理：矩形*BC*、*CD*等于*AC*上的正方形。

因为：倘若在一个直角三角形中，从直角顶向底边作垂线，那么垂线是所分底边两段的比例中项，[VI. 8，推论]

因此：*BD*比*DA*如同*DA*比*DC*，

因此：矩形*BD*、*DC*等于*AD*上的正方形。[VI. 17]

其次可以证明：*BC*、*AD*等于矩形*BA*、*AC*。

因为：*ABC*相似于*ABD*，

所以：*BC*比*CA*如同*BA*比*AD*，[VI. 4]

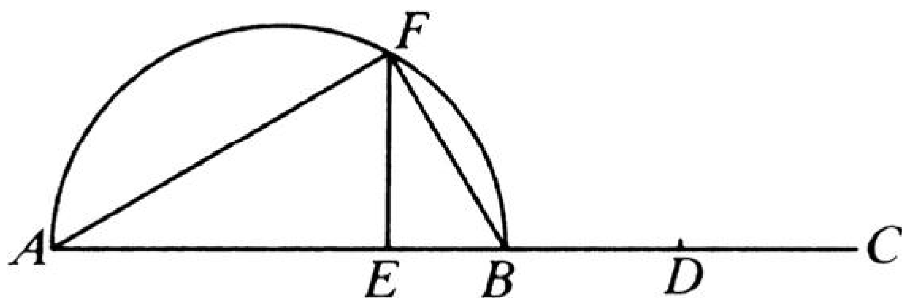
因此：矩形*BC*、*AD*等于矩形*BA*、*AC*。[VI. 16]

证完。

命题33

…

求正方不可公度的两线段，使得在它们上的正方形的和是有理的，而它们围成的矩形是中项面。



已知：*AB*、*BC*是仅正方可公度的两有理线段，使大线段*AB*上的正方形较小线段*BC*上的正方形大一个与*AB*是不可公度的线段上的正方形。[X. 30]

设：*D*平分*BC*。

在*AB*上贴合一个等于*BD*、*DC*之一上的正方形的矩形且缺少一个正方形，且设它是矩形*AE*、*EB*。[VI. 28]

在*AB*上画出半圆*AFB*，作*EF*与*AB*成直角，连接*AF*、*FB*。

因为：*AB*、*BC*不相等，且*AB*上的正方形比*BC*上的正方形大一个与*AB*不可公度的线段上的正方形，

根据假设：在AB上贴合一个等于BC上的正方形的四分之一，也就是AB一半上的正方形的矩形，

设：矩形为AE、EB。

因此：AE与EB是不可公度的。[X. 18]

因为：AE比EB如同矩形BA、AE比矩形AB、BE，

因为：矩形BA、AE等于AF上的正方形，矩形AB、BE等于BF上的正方形，

所以：AF上的正方形与FB上的正方形是不可公度的，

因此：AF、FB是正方不可公度的。

因为：AB是有理的，

因此：AB上的正方形也是有理的，

所以：AF、FB上的正方形的和也是有理的。[I. 47]

因为：矩形AE、EB等于EF上的正方形，

根据假设：矩形AE、EB等于BD上的正方形，

因此：FE等于BD，

因此：BC是FE的二倍，

所以：矩形AB、BC与矩形AB、EF也是可公度的。

因为：矩形AB、BC是中项面，[X. 21]

因此：矩形AB、EF也是中项面。[X. 23，推论]

因为：矩形AB、EF等于矩形AF、FB，[引理]

因此：矩形AF、FB也是中项面。

又因，已经证明：这些线段上的正方形的和是有理的，

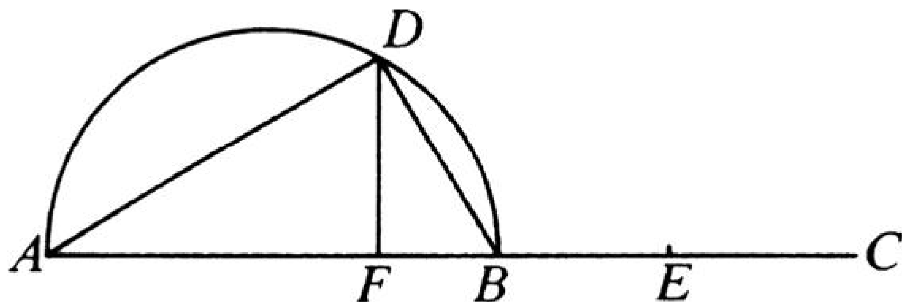
所以：求出了正方形不可公度的两线段AF、FB，使得它们上的正方形的和是有理的，由它们围成的矩形是中项面。

证完。

命题34

…

求正方不可公度的两线段，使其上的正方形的和是中项面，由它们围成的矩形是有理面。



设：AB、BC是仅正方可公度的两中项线，由它们围成的矩形是有理的，且AB上的正方形比BC上的正方形大一个与AB是不可公度的线段上的正方形，[X. 31]

在AB上画出半圆ADB，且BC被E平分，

在AB贴合上一个等于BE上的正方形的矩形且缺少一个正方形，也就是矩形AF、FB，[VI. 28]

因此：AF与FB是长度不可公度的。[X. 18]

又：从点F作FD和AB成直角，D在AB的半圆上，连接AD、DB，

因为：AF与FB是长度不可公度的，

所以：矩形BA、AF与矩形AB、BF也是不可公度的。[X. 11]

因为：矩形AB、AF等于AD上的正方形，矩形AB、BF等于DB上的正方形，

因此：AD上的正方形与DB上的正方形也是不可公度的。

因为：AB上的正方形是中项面，

因此：AD、DB上的正方形之和也是中项面。[III. 31，1. 47]

因为：BC是DF的二倍，

所以：矩形AB、BC也是矩形AB、FD的二倍。

因为：矩形AB、BC是有理的，

因此：矩形AB、FD也是有理的。[X. 6]

因为：矩形AB、FD等于矩形AD、DB，[引理]

因此：矩形AD、DB也是有理的。

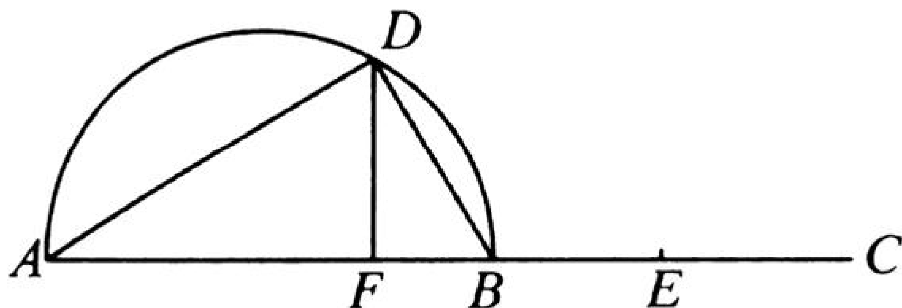
所以：已经求出了正方不可公度的两线段AD、DB，使得在它们上的正方形之和是中项面，但由它们围成的矩形是有理面。

证完。

命题35

…

求正方不可公度的两线段，使其上的正方形的和为中项面，且由它们围成的矩形为中项面，并且此矩形与上述两正方形的和不可公度。



设：AB、BC是仅正方可公度的两中项线，并且由它们围成的矩形是中项面，

以及AB上的正方形比BC上的正方形大一个与AB不可公度的线段上的正方形。[X. 32]

在AB上画出半圆ADB，并如前作出图的其余部分，

因此：AF与FB是长度不可公度的，[X. 18]

且AD与DB在正方形上也是不可公度的。[X. 11]

因为：AB上的正方形是中项面，

所以：AD、DB上的正方形的和也是中项面。[III. 31，I. 17]

因为：矩形AF、FB等于线段BE、DF之一上的正方形，

因此：BE等于DF，

所以：BC是FD的二倍，

因此：矩形AB、BC也是矩形AB、FD的二倍。

因为：矩形AB、BC是中项面，

因此：矩形AB、FD也是中项面。[X. 32]

又因：它等于矩形AD、DB，[X. 32后引理]

因此：矩形AD、DB也是中项面。

因为：*AB*与*BC*是长度不可公度的，*CB*与*BE*是可公度的，

所以：*AB*与*BE*也是长度不可公度的，[X. 13]

因此：*AB*上的正方形与矩形*AB*、*BE*也是不可公度的。[X. 11]

因为：*AD*、*DB*上的正方形的和等于*AB*上的正方形，[I. 47]

且矩形*AB*、*FD*，也就是矩形*AD*、*DB*等于矩形*AB*、*BE*，

因此：*AD*、*DB*上的正方形的和与矩形*AD*、*DB*是不可公度的。

所以：已经求出了是正方不可共度的两线段*AD*、*DB*，使得它们上的正方形的和是中项面，它们围成的矩形是中项面，以及该矩形与它们上的正方形的和是不可公度的。

证完。

命题36

…

假如把仅正方可公度的两有理线段相加，那么它们的和是无理的。称此线段为二项线。



设：*AB*、*BC*是仅正方可公度的两有理线段，

那么可以说：整体*AC*是无理的。

因为：*AB*与*BC*是仅正方可公度的，

所以：它们的长度不可公度。

因为：*AB*比*BC*如同矩形*AB*、*BC*比*BC*上的正方形，

所以：矩形AB、BC与BC上的正方形是不可公度的。[X. 11]

因为：二倍的AB、BC与矩形AB、BC是可公度的，[X. 6]

且根据假设：AB、BC是仅正方可公度的两有理线段，

所以：AB、BC上的正方形之和与BC上的正方形是可公度的，[X. 15]

因此：二倍矩形AB、BC与AB、BC上的正方形的和是不可公度的。[X. 13]

又因，由合比：二倍矩形AB、BC与AB、BC上的正方形相加，

也就是AC上的正方形[II. 4]与AB、BC上的正方形的和是不可公度的，[X. 16]

并且AB、BC上的正方形的和是有理的，

所以：AC上的正方形是无理的，

因此：AC也是无理的。[X. 定义4]

那么：称AC为二项线。

证完。

命题37

…

假如以两个仅正方可公度的中项线围成的矩形是有理的，那么两中项线的和是无理的，称此线段为第一双中项线。



设：AB、BC是正方可公度的中项线，由它们围成的矩形是有理

面，将两线段相加。

那么可以说：整个AC是无理的。

因为：AB与BC是长度不可公度的，

所以：AB、BC上的正方形之和与二倍的矩形AB、BC也是不可公度的，[参看X. 36]

且由合比：AB、BC上的正方形与二倍的矩形AB、BC的和，

也就是AC上的正方形[II. 4]，与矩形AB、BC是不可公度的。[X. 16]。

但根据假设：由于AB、BC是围成有理矩形的两线段，

所以：矩形AB、BC是有理的，

因此：AC上的正方形是无理的，

因此：AC是无理的，[X. 定义4]

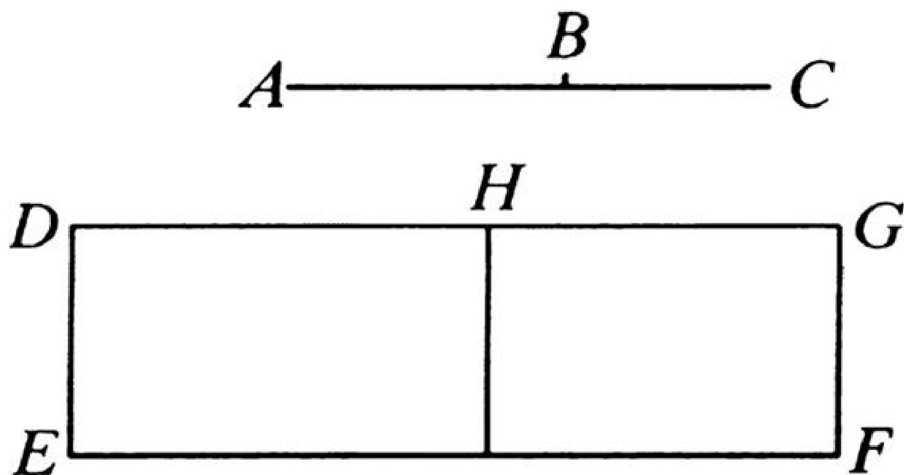
那么：称此线段为第一双中项线。

证完。

命题38

…

假如以两个仅正方可公度的中项线围成的矩形是中项面，那么两中项线的和是无理的，就称此线段为第二中项线。



设：AB、BC是仅正方可公度的两中项线，由它们围成的矩形是中项面，将两线段相加。

那么可以说：AC是无理的。

已知有理线段DE，在DE上贴合一个等于AC上的正方形的矩形DF，产生出DG作为宽。[I. 44]

因为：AC上的正方形等于AB、BC上的正方形与二倍矩形AB、BC的和，

设：EH为在DE上贴合一个等于AB、BC上的正方形的和；[II. 4]

因此：余量HF等于二倍的矩形AB、BC。

因为：AB、BC每一个都是中项线，

所以：AB、BC上的正方形是中项面。

根据假设：二倍矩形AB、BC也是中项面，

且EH等于AB、BC上的正方形的和，而FH等于二倍矩形AB、BC，

所以：矩形EH、HF都是中项面。

因为：它们是贴合于有理线段DE上，

所以：线段*DH*、*HG*都是有理的，并与*DE*是长度不可公度的。[X. 22]

因为：*AB*与*BC*是长度不可公度的，

且*AB*比*BC*如同*AB*上的正方形比矩形*AB*、*BC*，

所以：*AB*上的正方形与矩形*AB*、*BC*是不可公度的。[X. 11]

因为：*AB*、*BC*上的正方形的和与*AB*上的正方形是可公度的，[X. 15]

且二倍矩形*AB*、*BC*与矩形*AB*、*BC*是可公度的，[X. 6]

所以：*AB*、*BC*上的正方形的和与二倍矩形*AB*、*BC*是不可公度的。[X. 13]

因为：*EH*等于*AB*、*BC*上的正方形的和，

*HF*等于二倍矩形*AB*、*BC*，

所以：*EH*与*HF*是不可公度的，

所以：*DH*与*HG*也是长度不可公度的，[VI. 1，X. 11]

因此：*DH*、*HG*是仅正方可公度的两有理线段，

所以：面*DG*是无理的。[X. 36]

因为：*DE*是有理的，

并且由一条无理线段和一条有理线段围成的矩形是无理面，[X. 20]

所以：面*DF*是无理的，

那么：与*DF*相等的正方形的边是无理的。[X. 定义4]

因为：*AC*是等于*DF*的正方形的边，

所以：*AC*是无理线段，

因此：此线段为第二双中项线。

证完。

命题39

…

假如正方不可公度的二线段上的正方形的和是有理的，并由它们围成的矩形是中项面，那么由它们相加所得到的整条线段是无理的，称此线段为主线。



设：AB、BC是正方不可公度的两线段，满足[X.　33]中的条件，把两线段相加。

那么可以说：AC是无理线段。

因为：矩形AB、BC是中项面，

所以：二倍的矩形AB、BC也是中项面。[X. 6和23，推论]

因为：AB、BC上的正方形的和是有理的，

所以：二倍矩形AB、BC与AB、AC上的正方形的和是不可公度的，

因此：AB、BC上的正方形与二倍矩形AB、BC相加，

也就是AC上的正方形与AB、BC上的正方形的和也是不可公度的，[X. 16]

那么：AC上的正方形是无理的，

所以：AC也是无理的，[X. 定义4]

因此：此线段为主线。

证完。

命题40

…

假如正方不可公度的二线段上的正方形的和是中项面，并且由它们围成的矩形是有理的，那么二线段的和是无理的。因此称此线为中项面有理面和的边。



设：正方形不可公度的两线段AB、BC满足[X. 34]中的条件，将两线段相加。

那么可以说：AC是无理的。

因为：AB、BC上的正方形的和是中项面，二倍矩形AB、BC是有理面，

所以：AB、BC上的正方形的和与二倍矩形AB、BC是不可公度的，

因此：AC上的正方形与二倍矩形AB、BC也是不可公度的。[X. 16]

因为：二倍矩形AB、AC是有理的，

所以：AC上的正方形是无理的，

所以：AC是无理的，[X. 定义4]

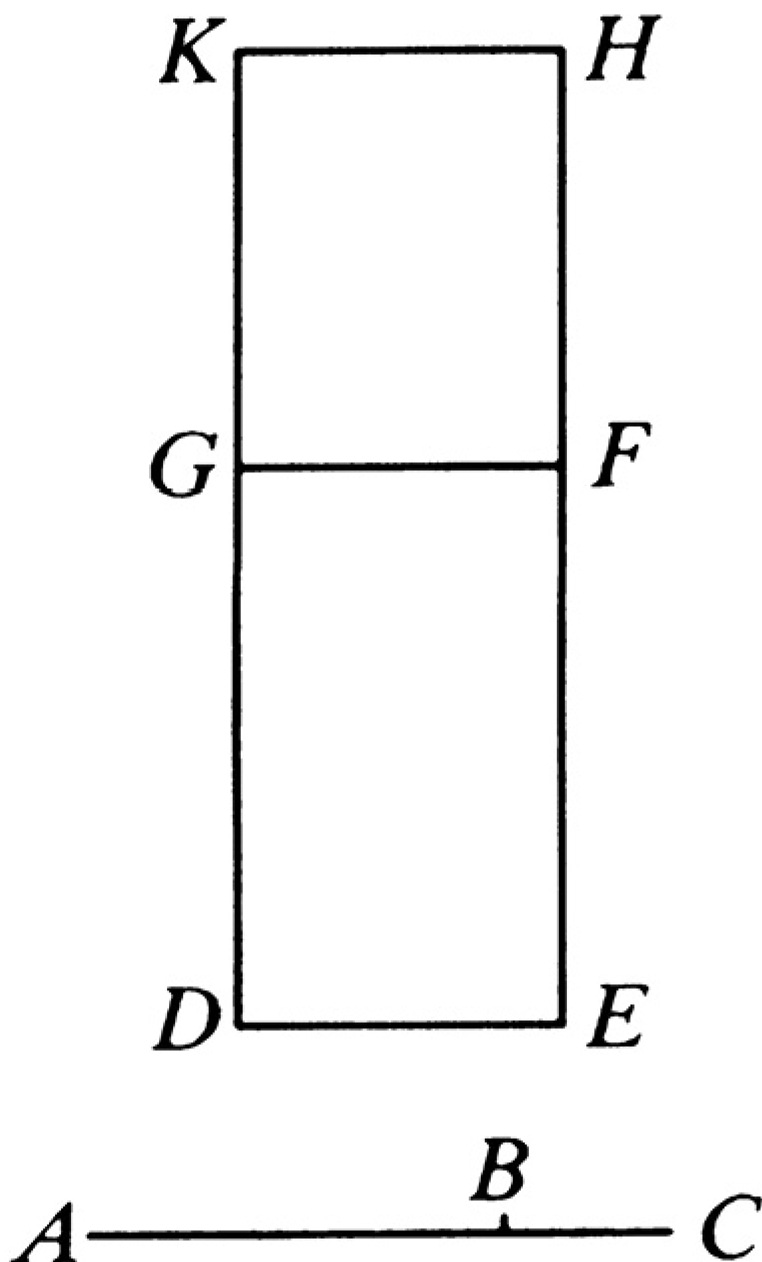
因此：称此线段为中项面有理面和的边。

证完。

命题41

…

假如正方不可公度的二线段上的正方形的和是中项面，由它们围成的矩形也是中项面，并且它与二线段上的正方形的和不可公度，那么二线段和是无理的。称它为两中项面和的边。



设：正方不可公度的两线段AB、BC满足[X.　35]中的条件，将两线段相加。

那么可以说：AC是无理的。

已知：有理线段DE，

那么：在DE上贴合一个矩形DF等于AB、BC上的正方形的和，且作矩形GH等于二倍矩形AB、BC，

因此：DH等于AC上的正方形。[II. 4]

因为：AB、BC上的正方形的和是中项面，且等于DF，

所以：DF也是中项面。

因为：它是贴合于有理线段DE上的，

所以：DG是有理的，并与DE是长度不可公度的。[X. 22]

同理：GK也是有理的，且与GF，也就是DE，是长度不可公度的。

因为：AB、BC上的正方形的和与二倍矩形AB、BC是不可公度的，也就是DF与GH是不可公度的，

所以：DG与GK也是不可公度的。[VI. 1，X. 11]

又因：它们是有理的，

因此：DG、GK是仅正方可公度的两有理线段，

因此：DK是称为二项线的无理线段。[X. 36]

又因：DE是有理的，

所以：DH是无理的，且与它相等的正方形边是无理的。[X. 定义4]

因为：AC是等于HD上的正方形的边，

因此：AC是无理的，

所以：称此线段为两中项面的和的边。

证完。

引理

…

前面命题所说的无理线段都只有一种方法被分为两条线段。它是它们的和，这种划分方式也产生出问题的各个类型，现将叙述如下的引理作为前提之后作出证明。



已知：线段*AB*，由两点*C*、*D*的每一个分*AB*为不等的两部分，

设：*AC*大于*DB*。

那么可以说：*AC*、*CB*上的正方形的和大于*AD*、*DB*上的正方形的和，

因此，设：*AB*被*E*平分。

因为：*AC*大于*DB*，如果从它们中减去*DC*，那么余量*AD*大于余量*CB*，

又因：*AE*等于*EB*，

所以：*DE*小于*EC*，也就是*C*、*D*两点与中点距离不等。

因为：矩形*AC*、*CD*连同*EC*上的正方形等于*EB*上的正方形，[II. 5]

且矩形*AD*、*DB*连同*DE*上的正方形等于*EB*上的正方形，[II. 5]

所以：矩形*AC*、*CB*连同*EC*上的正方形等于矩形*AD*、*DB*连同*DE*上的正方形。

因为：*DE*上的正方形小于*EC*上的正方形，

所以：余量，也就是矩形*AC*、*CB*小于矩形*AD*、*DB*，

因此：二倍矩形*AC*、*CB*小于二倍矩形*AD*、*DB*，

因此：余量，也就是*AC*、*CB*上的正方形的和大于*AD*、*DB*上的正方形的和。

证完。

命题42

…

一个二项线仅在一点被分为它的两段。



设：*AB*是二项线，并在*C*点被分为两段，

那么：*AC*、*CB*是仅正方可公度的两有理线段。[X. 36]

那么可以说：*AB*在另外的点不能被分为仅正方可公度的两有理线段。

设：它在*D*点被分，

AB、*DB*也是仅正方可公度的两有理线段。

因为：*AC*与*DB*不相同，

否则：*AD*也与*CB*相同，

所以：*AC*比*CB*将如同*BD*比*DA*，

因此：点*D*分*AB*与点*C*分*AB*的方法相同，

这与假设矛盾，

因此：AC与DB不相同，

所以：点C、D离中点不相等。

由于：AC、CB上的正方形加二倍矩形AC、CB与AD、DB上的正方形加二倍矩形AD、DB都等于AB上的正方形，[II. 4]

所以：AC、CB上的正方形之和与AD、DB上的正方形之和的差，也就是二倍矩形AD、DB与二倍矩形AC、CB的差。

因为：AC、CB上的正方形的和与AD、DB上的正方形的和的差是有理面；这是因为两者都是有理面，

因此：二倍矩形AD、DB与二倍矩形AC、CB的差也是有理矩形，

然而它们是中项面，[X. 21]

这并不符合实际，

因为：一个中项面不会比一个中项面大一个有理面，[X. 26]

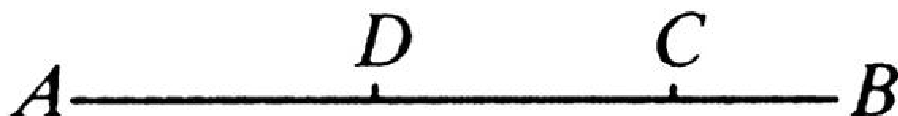
因此：一个二项线不可能在不同点被分为它的两段，因此它只能被一点分为它的两段。

证完。

命题43

…

一个第一双中项线，仅在一点被分为它的两段。



设：一个第一双中项线AB在C点被分，使得AC、CB是仅正方可公度的两中项线，并且由它们围成的矩形是有理的。[X. 37]

那么可以说：再无另外的点分AB为如此二段。

设：它在D点也被分为两段，使得AD、DB也是仅正方可公度的两中项线，由它们围成的矩形是有理的矩形。

因为：二倍矩形AD、DB与二倍矩形AC、CB的差等于AC、CB上的正方形的和与AD、DB上的正方形和的差，

且二倍矩形AD、DB与二倍矩形AC、CB的和是有理面，这是因为它们都是有理面，

因此：它们的差也是有理面，

所以：AC、BC上的正方形的和与AD、DB上的正方形的和的差也是有理面，

但是，它们是中项面，

这是不符合实际的，[X. 26]

所以：第一双中项线在不同的点不能被分为它的两段，

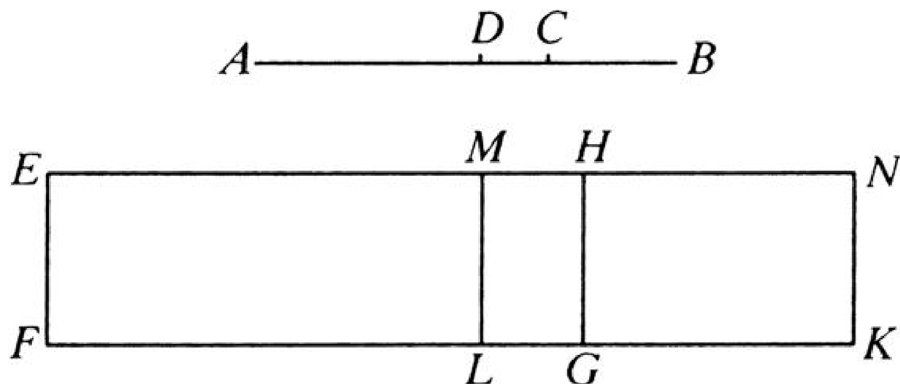
因此：它仅在一点被分为它的两段。

证完。

命题44

…

一个第二双中项线仅在一点被分为它的两段。



设：一个第二双中项线*AB*在*C*点被分，使得*AC*、*CB*是仅正方可公度的两中项线，并由它们围成的矩形是中项面，[X. 38]

所以：*C*不是*AB*的平分点，这是因为它们不是长度可公度的。

那么可以说：没有其他的点分*AB*为如此的两段。

设：*D*点也分*AB*为它的两段，

那么：*AC*与*DB*不相同，且*AC*是较大的。

按照上面[引理]已证明的：*AD*、*DB*上的正方形的和小于*AC*、*CB*上的正方形的和，

设：*AD*、*DB*是仅正方可公度的两中项线，

并且由它围成的矩形是中项面。

已知：一条有理线段*EF*，在*EF*上贴合一矩形*EK*等于*AB*上的正方形，并减去等于*AC*、*CB*上的正方形的和的*EG*，

因此：余量*HK*等于二倍的矩形*AC*、*CB*。[II. 4]

设：减去等于*AD*、*DB*上的正方形的和的*EL*，

已经证明：它小于*AC*、*CB*上的正方形的和，[引理]

所以：余量*MK*等于二倍矩形*AD*、*DB*。

因为：AC、CB上的正方形都是中项面，

所以：EG是中项面，

因为：它是贴合在有理线段EF上的，

所以：EH与EF是长度不可公度的有理线段。[X. 22]

同理：HN也是与EF长度不可公度的有理线段。

因为：AC、CB是仅正方可公度的中项线，

所以：AC与CB是长度不可公度的。

因为：AC比CB如同AC上的正方形比矩形AC、CB，

所以：AC上的正方形与矩形AC、CB是不可公度的。[X. 11]

因为：AC、CB上的正方形之和与AC上的正方形是可公度的，

且AC、CB是正方可公度的，[X. 15]

又因：二倍矩形AC、CB与矩形AC、CB是可公度的，[X. 6]

所以：AC、CB上的正方形也与二倍矩形AC、CB是不可公度的。[X. 13]

因为：EG等于AC、CB上的正方形的和，且HK等于二倍的矩形AC、CB，

所以：EG与HK不可公度，

因此：EH与HN也是长度不可公度的。[VI. 1，X. 11]

因为：它们是有理的，

所以：EH、HN是仅正方可公度的两有理线段。

因为：正方可公度的两有理线段的和是称为二项线的无理线段，[X. 36]

所以：*EN*是点*H*被分的二项线。

同理可证：*EM*、*MN*也是仅正方可公度的两有理线段，

且*EN*是在不同的点*H*和*M*所分的二项线，

因为：*EH*与*MN*不相同，

且*AC*、*CB*上的正方形的和大于*AD*、*DB*上的正方形的和，

又因：*AD*、*DB*上的正方形的和大于二倍矩形*AD*、*DB*，

且*AC*、*CB*上的正方形的和，也就是*EG*，更大于二倍矩形*AD*、*DB*，也就是*MK*，

因此：*EH*大于*MN*，

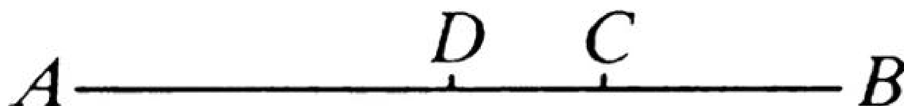
因此：*EH*与*MN*不相同。

证完。

命题45

…

一条主线仅在一点被分为它的两段。



设：一条主线*AB*在*C*点被分，使得*AC*、*CB*是正方不可公度的，

并且*AC*、*CB*上的正方形的和是有理面，而它们围成的矩形是中项面。

那么可以说：没有另外的点分*AB*为如此的两段。

设：它在*D*点被分，

那么：*AD*、*DB*也是正方不可公度的，且*AD*、*DB*上的正方形的和是有理面。

又因：它们围成的矩形是中项面，

并且，因为：*AC*、*CB*上的正方形的和与*AD*、*DB*上的正方形的和的差等于二倍矩形*AD*、*DB*与二倍矩形*AC*、*CB*的差，

且*AC*、*CB*上的正方形的和与*AD*、*DB*上的正方形的和的差是有理面，这是因为二者都是有理的，

所以：二倍矩形*AD*、*DB*与二倍矩形*AC*、*CB*的差是有理面，

但是它们是中项面，

这是不符合实际的，[X. 26]

因此：一条主线在不同点不能被分为它的两段，

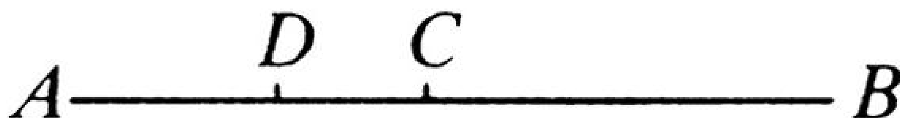
所以：一条主线仅在一点被分为它的两段。

证完。

命题46

…

一个中项面有理面和的边仅在一点被分为它的两段。



设：*AB*是中项面有理面和的边在*C*点被划分为它的两段，使得*AC*、*CB*是正方不可公度的。并且*AC*、*CB*上的正方形的和是中项面，二倍的矩形*AC*、*CB*是有理的。[X. 40]

那么可以说：没有另外的点分*AB*为如此的两段。

设：它也在*D*点被分为两段，使得*AD*、*DB*也是正方不可公度的，并且*AD*、*DB*上的正方形的和是中项面，而二倍矩形*AD*、*DB*是有理面。

因为：二倍矩形*AC*、*CB*与二倍矩形*AD*、*DB*的差等于*AD*、*DB*上的正方形的和与*AC*、*CB*上的正方形和的差，

且二倍矩形*AC*、*CB*与二倍矩形*AD*、*DB*的差是有理面，

所以：*AD*、*DB*上的正方形的和与*AC*、*CB*上的正方形的和的差是有理面，

又因：它们是中项面，

这并不符合实际，[X. 26]

因此：中项面有理面和的边在不同的点不能被分为它的两段，

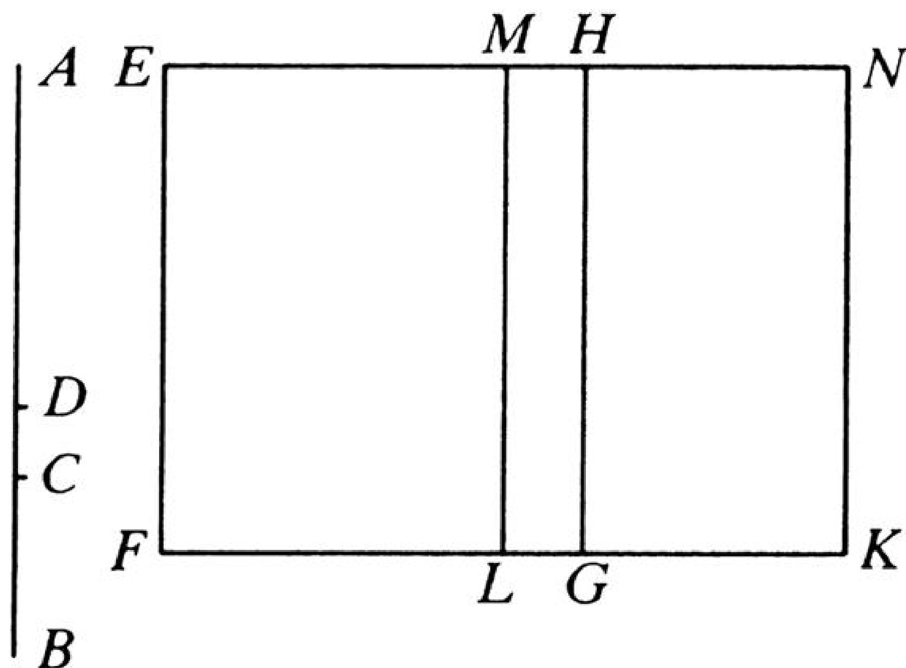
因此：它仅在一点被分为它的两段。

证完。

命题47

…

一个两中项面和的边仅在一点被分为它的两段。



设：AB分于C点，使得AC、CB是正方不可公度的，

且AC、CB上的正方形的和是中项面，矩形AC、CB是中项面，并且此矩形与AC、CB上的正方形的和也是不可公度的。

那么可以说：没有另外的点分AB为两段，适合给定的条件。

设：它在点D被分，并且AC不同于BD，其中AC是较大者。

已知：EF是有理线段，

在EF上贴合一个矩形EG等于AC、CB上的正方形的和，作矩形HK等于二倍的矩形AC、CB。

因此：EK等于AB上的正方形。[II. 4]

在EF上贴合一个EL等于AD、DB上的正方形的和，

所以：余量，也就是二倍矩形AD、DB等于余量MK。

根据假设：AC、CB上的正方形的和是中项面，

因此：EG也是中项面。

因为：它是贴合于有理线段EF上，

所以：HE是有理的，并且与EF是长度不可公度的。[X. 22]

同理：HN也是有理的，并且与EF是长度不可公度的。

因为：AC、CB上的正方形的和与二倍矩形AC、CB是不可公度的，

所以：EG与GN也是不可公度的，

所以：EH与HN也是不可公度的。[VI. 1，X. 11]

又因：它们是有理的，

所以：EH、HN是仅正方可公度的两有理线段，

因此：EN是被分于H点的二项线。[X. 36]

同理可证：EN是被分于M点的二项线。

因为：EH不同于MN，

所以：一个二项线有不同分点，

这是不符合实际的，

所以：一个两中项面和的边在不同点不能被分为它的两段，

因此：它仅在一点被分为它的两段。

证完。

定义II

01 给定一条有理线段和一个二项线，并把二项线分为它的两段，使长线段上的正方形比短线段上的正方形大一个与长线段是长度可公度的线段上的正方形，如果长线段与给定的有理线段为长度可公度的，则把原二项线称为第一二项线。

02 但若短线段与所给的有理线段是长度可公度的，则称原二项线为第二二项线。

03 若二线段与所给的有理线段都不是长度可公度的，则称原二项线为第三二项线。

04 若长线段上的正方形比短线段上的正方形大一个与长线段为长度不可公度的线段上的正方形。如果长线段与给定的有理线段为长度可公度，那么称原二项线为第四二项线。

05 如果短线段与给定的有理线段是长度可公度的，那么称此二项线为第五二项线。

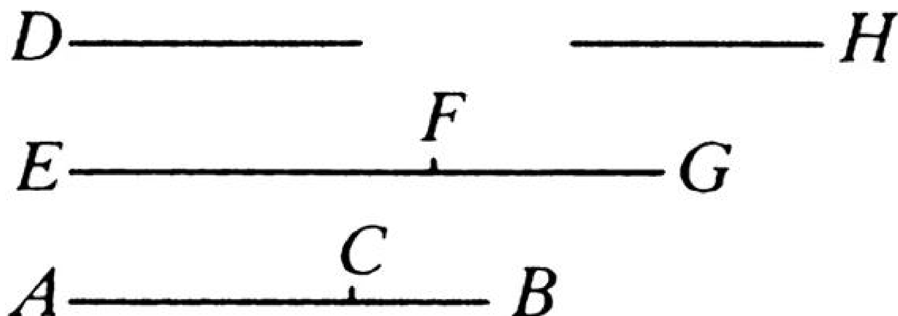
06 如果两线段与给定的有理线段都不是长度可公度的，那么称此二项线为第六二项线。

命题

命题48

…

求第一二项线。



已知：两数AC、CB的和AB与BC之比如同一个平方数比一个平方数，但它们的和与AC之比不同于一个平方数比一个平方数。[X．28后之引理1]

已知：有理线段D、EF与D是长度可公度的，

因此：EF也是有理的。

设：作出以下比例使得数BA比AC如同EF上的正方形比FG上的正方形。[X. 6，推论]

因为：AB与AC之比如同一个数比另一个数，

所以：EF上的正方形与FG上的正方形之比也如同一个数比另一个数，

所以：EF上的正方形与FG上的正方形是可公度的。[X. 6]

因为：EF是有理的，

因此：FG也是有理的。

因为：BA与AC之比不同于一个平方数比一个平方数，

所以：EF上的正方形与FG上的正方形之比不同于一个平方数比一个平方数，

所以：EF与FG是长度不可公度的，[X. 9]

因此：EF、FG是仅正方形可公度的两有理线段，

因而：EG是二项线。

接下来可以证明：EG是第一二项线。

因为：数BA比AC如同EF上的正方形比FG上的正方形，BA大于AC，

所以：EF上的正方形大于FG上的正方形。

设：FG、H上的正方形之和等于EF上的正方形。

因为：AB比AC如同EF上的正方形比FG上的正方形，

由换比：AB比BC如同EF上的正方形比H上的正方形，[V. 19，推论]

因为：AB与BC之比如同一个平方数比一个平方数，

所以：EF上的正方形与H上的正方形之比也如同一个平方数比一个平方数，

所以：EF与H是长度可公度的，[X. 9]

因此：EF上的正方形比FG上的正方形大一个与EF是可公度的线段上的正方形。

因为：EF、FG都是有理的，EF与D是长度可公度的，

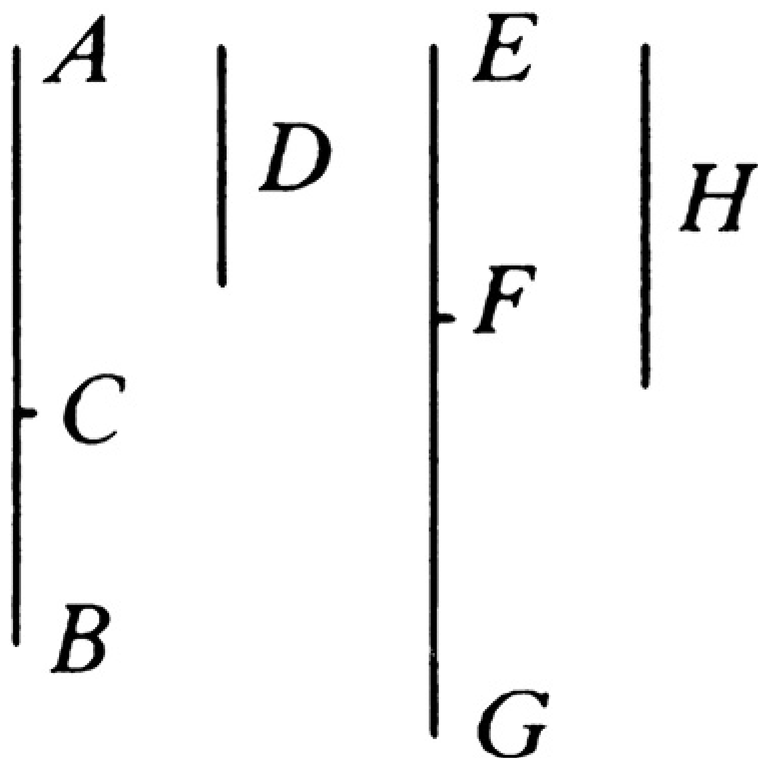
所以：EG是一个第一二项线。

证完。

命题49

…

求第二二项线。



已知：数*AC*、*CB*的和*AB*与*BC*之比如同一个平方数比一个平方数，*AB*与*AC*之比不同于一个平方数比一个平方数。有理线段*D*与线段*EF*是长度可公度的，*EF*是有理的。

设：作出以下比例使得数*CA*比*AB*如同*EF*上的正方形比*FG*上的正方形，[X. 6，推论]

因此：*EF*上的正方形与*FG*上的正方形是可公度的，[X. 6]

所以：*FG*也是有理的。

因为：数CA与AB之比不同于一个平方数比一个平方数，

所以：EF上的正方形与FG上的正方形之比不同于一个平方数比一个平方数，

因此：EF与FG是长度不可公度的，[X. 9]

所以：EF、FG是仅正方可公度的两有理线段，

所以：EG是二项线。[X. 36]

接下来可以证明：EG是第二二项线。

由反比：数BA比AC如同GF上的正方形比FE上的正方形，BA大于AC，

所以：GF上的正方形大于FE上的正方形。

设：EF、H上的正方形之和等于GF上的正方形，

由换比：AB比BC如同FG上的正方形比H上的正方形。[X. 19，推论]

因为：AB比BC之比如同一个平方数比一个平方数，

因此：FG上的正方形与H上的正方形之比如同一个平方数比一个平方数，

所以：FG与H是长度可公度的，[X. 9]

所以：FG上的正方形比FE上的正方形大一个与FG是可公度的线段上的正方形。

因为：FG、FE是仅正方公度的两有线段，短线段EF与所给有理线段D是长度可公度的，

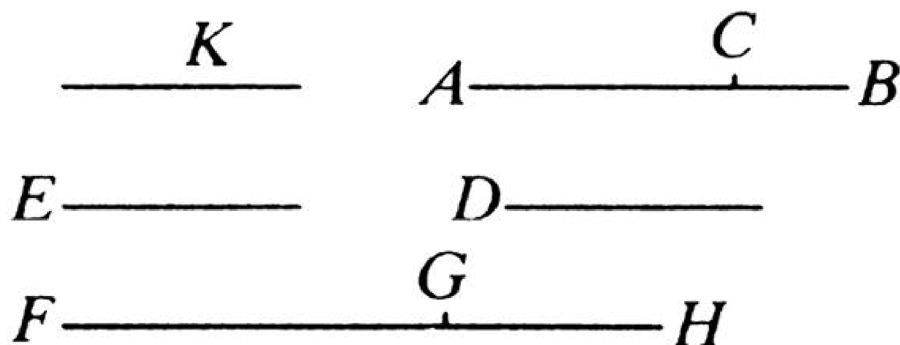
因此：EG是第二二项线。

证完。

命题50

…

求第三二项线。



已知有两数*AC*、*CB*，使它们的和*AB*与*BC*的比如同一个平方数比一个平方数，但*AB*与*AC*之比不同于一个平方数比一个平方数。

设：另一个非平方数为*D*，且*D*与*BA*、*AC*的每一个的比不同于一个平方数比一个平方数。

已知有理线段*E*，作出比例，

使得*D*比*AB*如同*E*上的正方形比*FG*上的正方形，[X. 6，推论]

因此：*E*上的正方形与*FG*上的正方形是可公度的。[X. 6]

因为：*E*是有理的，

所以：*FG*也是有理的。

因为：*D*与*AB*之比不同于一个平方数比一个平方数，

因此：*E*上的正方形与*FG*上的正方形之比不同于一个平方数比一个平方数，

因此：*E*与*FG*是长度不可公度的。[X. 9]

又设：作出比例，

使得BA比AC如同FG上的正方形比GH上的正方形，[X. 6，推论]

所以：FG上的正方形与GH上的正方形是可公度的。[X. 6]

因为：FG是有理的，

因此：GH也是有理的。

因为：BA与AC之比不同于一个平方数比一个平方数，

所以：FG上的正方形与HG上的正方形之比不同于一个平方数比一个平方数，

因此：FG与GH是长度不可公度的，[X. 9]

因此：FG、GH是仅正方可公度的两有理线段，

那么：FH是二项线。[X. 36]

接下来可以证明：它也是第三二项线。

因为：D比AB如同E上的正方形比FG上的正方形，

且BA比AC如同FG上的正方形比GH上的正方形，

因此，取首末比：D比AC如同E上的正方形比GH上的正方形。[V. 22]

因为：D与AC之比不同于一个平方数比一个平方数，

所以：E上的正方形与GH上的正方形之比不同于一个平方数比一个平方数，

因此：E与GH是长度不可公度的。[X. 9]

因为：BA比AC如同FG上的正方形比GH上的正方形，

因此，由换比：AB比BC如同FG上的正方形比K上的正方形。[V.

19，推论]

因为：AB与BC之比如同一个平方数比一个平方数，

因此：FG上的正方形与K上的正方形的比如同一个平方数比一个平方数，

所以：FG与K是长度可公度的，[X. 9]

所以：FG上的正方形比GH上的正方形大一个与FG是可公度的线段K上的正方形。

因为：FG、GH是仅正方可公度的两有理线段，

且它们的每一个与E是长度不可公度的，

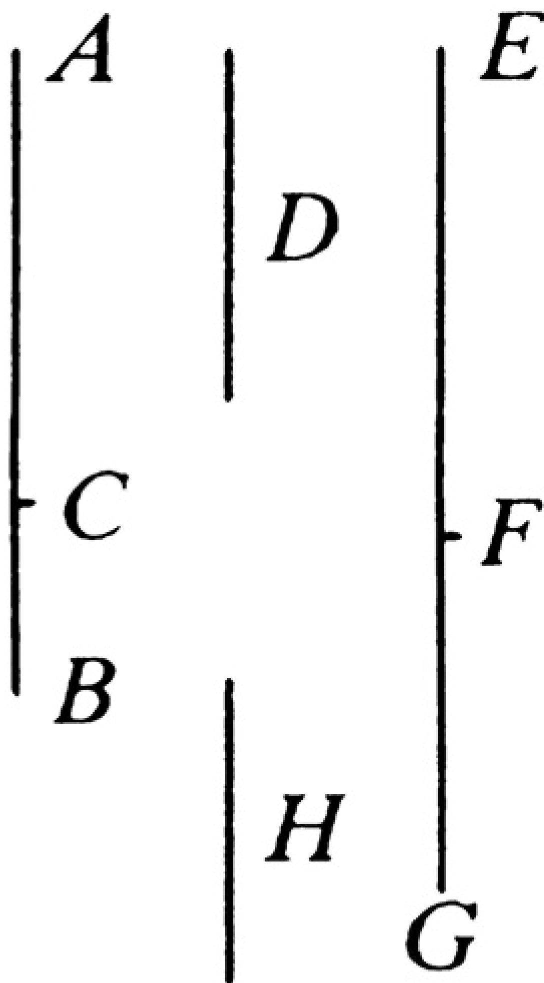
因此：FH是第三二项线。

证完。

命题51

…

求第四二项线。



已知两数*AC*、*CB*，而它们的和*AB*与*BC*及与*AC*的比都不同于一个平方数比一个平方数。

设：已知有理线段*D*，而*D*与*EF*是长度可公度的，

那么：*EF*是有理的。

设：作出比例，使得数*BA*比*AC*如同*EF*上的正方形比*FG*上的正方形，[X. 6，推论]

那么：*EF*上的正方形与*FG*上的正方形是可公度的，[X. 6]

所以：*FG*也是有理的。

因为：BA与AC之比不同于一个平方数比一个平方数，

所以：EF上的正方形与FG上的正方形之比不同于一个平方数比一个平方数，

因此：EF与FG是长度不可公度的，[X. 9]

所以：EF、FG是仅正方可公度的两有理线段，

因此：EG是二项线。

接下来可以证明：EG是一个第四二项线。

因为：BA比AC如同EF上的正方形比FG上的正方形，

因此：EF上的正方形大于FG上的正方形。

设：FG、H上的正方形的和等于EF上的正方形；

因此，由换比：数AB比BC如同EF上的正方形比H上的正方形。[V. 19，推论]

因为：AB与BC之比不同于一个平方数比一个平方数，

所以：EF上的正方形与H上的正方形之比不同于一个平方数比一个平方数，

因此：EF与H是长度不可公度的，[X. 9]

因此：EF上的正方形比GF上的正方形大于一个与EF是不可公度的线段H上的正方形。

因为：EF，FG是仅正方形可公度的两有理线段，

且EF与D是长度可公度的，

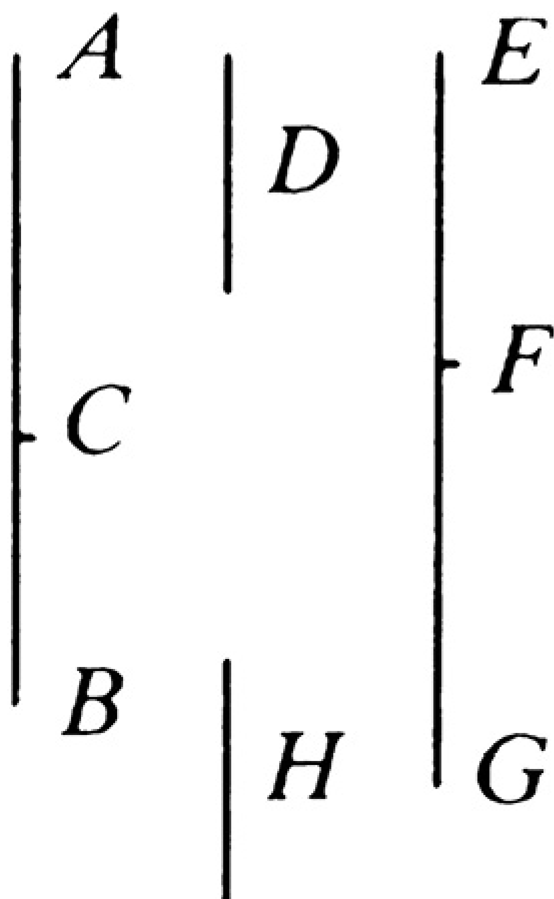
所以：EG是一个第四二项线。

证完。

命题52

…

求第五二项线。



已知两数AC、CB，且AB与它们每一个的比不同于一个平方数比一个平方数。

设：已知有理线段D，且D与EF是可公度的，

那么：EF是有理的。

设：作出比例，

使得CA比AB如同EF上的正方形比FG上的正方形。[X. 6，推论]

因为：CA与AB之比不同于一个平方数比一个平方数，

所以：EF上的正方形与FG上的正方形的比也不同于一个平方数比一个平方数，

因此：EF、FG是仅正方可公度的两有理线段，[X. 9]

因此：EG是二项线。[X. 36]

接下来可以证明：EG是第五二项线。

因为：CA比AB如同EF上的正方形比FG上的正方形，

由反比：BA比AC如同FG上的正方形比FE上的正方形，

所以：GF上的正方形大于EF上的正方形。

设：EF、H上的正方形的和等于GF上的正方形，

因此，由换比：数AB比BC如同GF上的正方形比H上的正方形。[V. 19，推论]

因为：AB与BC的比不同于一个平方数比一个平方数，

所以：FG上的正方形与H上的正方形的比也不同于一个平方数比一个平方数，

因此：FG与H是长度不可公度的，[X. 9]

所以：FG上的正方形比FE上的正方形大一个与FG是不可公度的线段H上的正方形。

因为：GF、FE是仅正方可公度的两有理线段，

且短线段EF与所给有理线段D是长度可公度的，

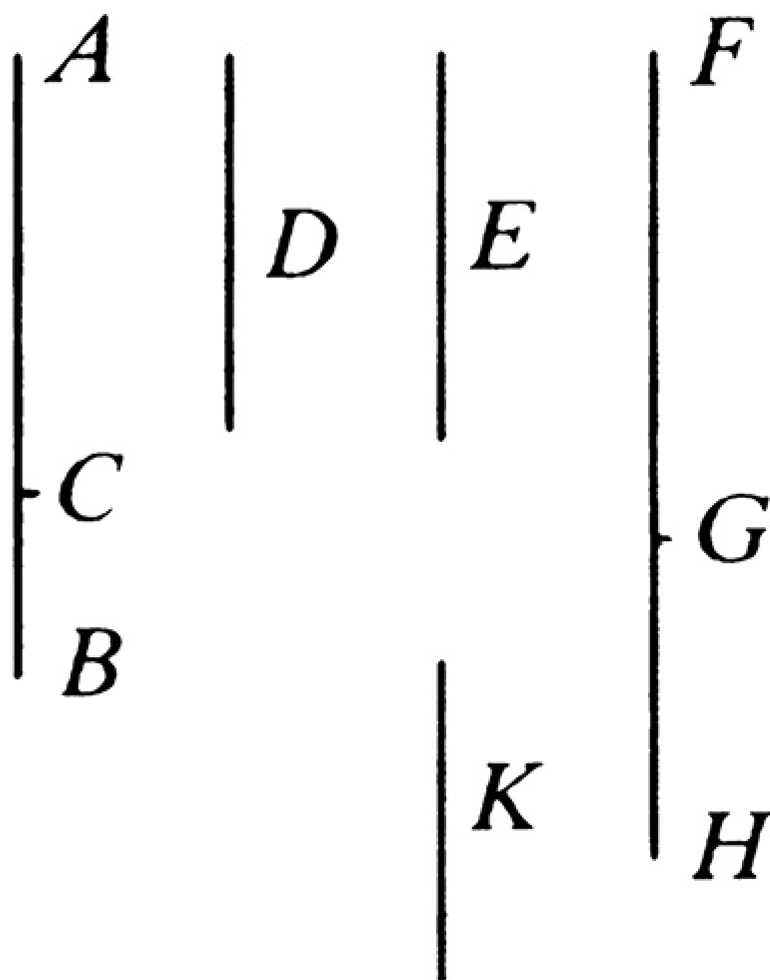
所以：EG是一个第五二项线。

证完。

命题53

…

求第六二项线。



已知两数AC、CB，且它们的和AB与它们每一个的比都不同于一个平方数比一个平方数。并且已知非平方数D，且D与数BA、AC每一个的比都不同于一个平方数比一个平方数。

又已知有理线段E，

那么，作出比例：使得D比AB如同E上的正方形比FG上的正方形；[X. 6，推论]

因此：E上的正方形与FG上的正方形是可公度的。[X. 6]

因为：E是有理的，

所以：FG是有理的。

因为：D与AB的比不同于一个平方数比一个平方数，

所以：E上的正方形与FG上的正方形的比也不同于一个平方数比一个平方数，

因此：E与FG是长度不可公度的。[X. 9]

作出比例：BA比AC如同FG上的正方形比GH上的正方形，[X. 6，推论]

所以：FG上的正方形与HG上的正方形是可公度的，[X. 6]

因此：HG上的正方形是有理的，

所以：HG是有理的。

因为：BA与AC的比不同于一个平方数比一个平方数，

所以：FG上的正方形与GH上的正方形的比也不同于一个平方数比一个平方数，

因此：FG与GH是长度不可公度的，[X. 9]

所以：FG、GH是仅正方可公度的两有理线段，

因此：FH是二项线。[X. 36]

接下来可以证明：FH也是一个第六二项线。

因为：D比AB如同E上的正方形比FG上的正方形，

且BA比AC如同FG上的正方形比GH上的正方形，

因此，取首末比：D比AC如同E上的正方形比GH上的正方形。[V. 22]

因为：D与AC的比不同于一个平方数比一个平方数，

所以：E上的正方形与GH上的正方形的比也不同于一个平方数比一个平方数，

所以：E与GH是长度不可公度的。[X. 9]

又因，已知证明：E与FG不可公度，

因此：两线段FG、GH的每一个与E是长度不可公度的。

因为：BA比AC如同FG上的正方形比GH上的正方形，

所以：FG上的正方形大于GH上的正方形。

那么，设：GH、K上的正方形的和等于FG上的正方形，

由换比：AB比BC如同FG上的正方形比K上的正方形。[V. 19，推论]

因为：AB与BC的比不同于一个平方数比一个平方数，

所以：FG上的正方形与K上的正方形的比也不同于一个平方数比一个平方数，

因此：FG与K是长度不可公度的，[X. 9]

所以：FG上的正方形比GH上的正方形大于一个与FG是不可公度的线段K上的正方形。

因为：FG、GH是仅正方可公度的两有理线段，

并且它们每一个与给定的有理线段*E*是长度不可公度的，

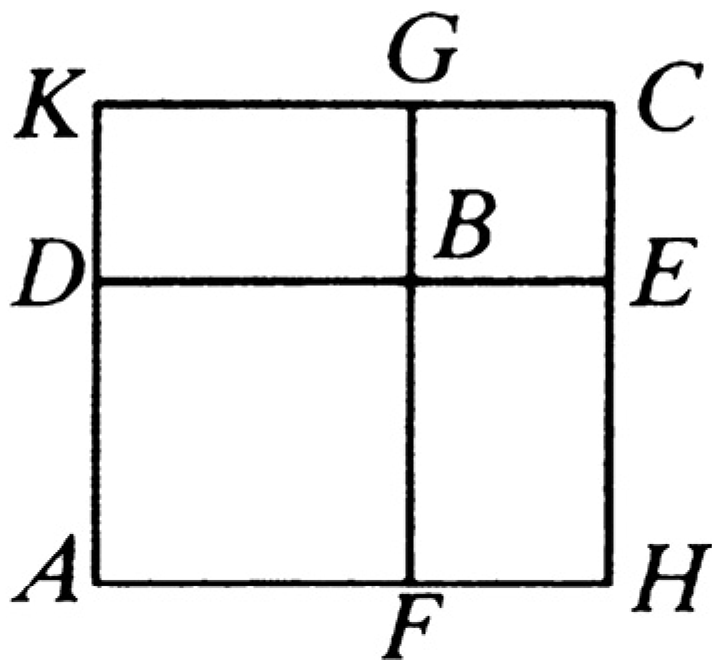
因此：*FH*是一个第六二项线。

证完。

引理

…

设有两个正方形**AB**、**BC**，使它们的边**DB**与边**BE**在同一直线上，因而**FB**与**BG**也在同一直线上。



已知有平行四边形*AC*。

那么可以说：*AC*是正方形，且*DC*是*AC*、*BC*的比例中项，且*DC*是*AC*、*CB*的比例中项。

因为：*DB*等于*BF*，且*BE*等于*BG*，

因此：整体*DE*等于整体*FG*。

因为：DE等于线段AH、KC的每一个，

FG等于线段AK、HC的每一个，[I. 34]

所以：线段AH、KC每一个等于线段AK、HC每一个，

所以：AC是一个等边的平行四边形，也是一个直角的，

因此：AC是一个正方形。

因为：FB比BG如同DB比BE，

因为：FB比BG如同AB比DG，

且DB比BE如同DG比BC，[VI. 1]

所以：AB比DG如同DG比BC，[V. 11]

所以：DG是AB、BC的比例中项。

接下来可以证明：DC也是AC、BC的比例中项。

因为：AD比DK如同KG比GC，

且它们分别相等，

因此，由合比：AK比KD如同KC比CG。[V. 18]

因为：AK比KD如同AC比CD，

且KC比CG如同DC比CB，[VI. 1]

所以：AC比DC如同DC比BC，[V. 11]

所以：DC 是AC、CB的比例中项，

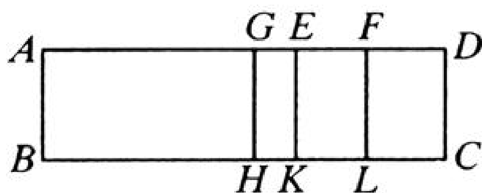
这就是所要求证明的。

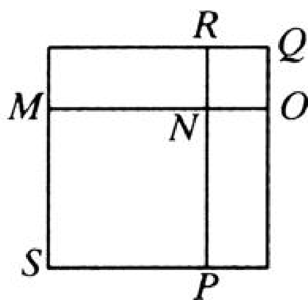
证完。

命题54

…

假如一条有理线段与第一二项线围成一个面[矩形]，那么这个面的边是称为二项线的无理线段。





设：有理线段*AB*和第一二项线*AD*围成一个面*AC*。

那么可以说：面*AC*的边是被称为二项线的无理线段。

因为：*AD*是一个第一二项线，

那么，设：点*E*将*AD*分为两段，其中*AE*是长段。

因为：*AE*、*ED*是仅正方可公度的两有理线段，

并且*AE*上的正方形比*ED*上的正方形大一个与*AE*是可公度的线段上的正方形，

而*AE*与给出的有理线段*AB*是长度可公度的。[X. 定义II. 1]

又设：*ED*被点*F*平分。

因为：*AE*上的正方形比*ED*上的正方形大一个与*AE*是可公度的线段上的正方形，

倘若在大线段*AE*上贴合一个等于*ED*上的正方形的四分之一，也就是等于*EF*上的正方形，且缺少一个正方形的矩形，

那么：AE被分为长度可公度的两段。[X. 17]

因为：在AE上贴合一个矩形AG、GE等于EF上的正方形，

所以：AG与EG是长度可公度的。

设：从G、E、F分别画出平行于AB、CD的线段GH、EK、FL，

且作出正方形SN等于矩形AH，和正方形NQ等于GK，[II. 14]

又设：MN与NO在一条直线上，

因此：RN与NP也在一条直线上。

因为：完全画出平行四边形，

所以：SQ是正方形。[引理]

因为：矩形AG、GE等于EF上的正方形，

所以：AG比EF如同FE比EG，[VI. 17]

因此：AH比EL如同EL比KG，[VI. 1]

所以：EL是AH、GK的比例中项。

因为：AH等于SN，GK等于NQ，

所以：EL是SN、NQ的比例中项。

因为：MR同样是相同的SN、NQ的比例中项，[引理]

所以：EL等于MR，

因此：它等于PO。

因为：AH、GK分别等于SN、NQ。

所以：整体AC等于整体SQ，也就是MO上的正方形，

因此：MO是AC的边。

接下来可以证明：MO是二项线。

因为：AG与GE是可公度的。

因此：AE与线段AG、GE每一个也是可公度的。[X. 15]

根据设：AE与AB也是可公度的，

所以：AG、GE与AB也是可公度的。[X. 12]

因为：AB是有理的，

因此：线段AG、GE的每一个也是有理的，

所以：矩形AH、GK每一个是有理的，[X. 19]

所以：AH与GK是可公度的。

因为：AH等于SN，而GK等于NQ，

因此：SN、NQ，也就是MN、NO上的正方形都是有理的，并且是可公度的。

因为：AE与ED是长度不可公度的，

且AE与AG是可公度的，DE与EF是可公度的，

所以：AG与EF也是不可公度的，[X. 13]

因此：AH与EL也是不可公度的。[VI. 1，X. 11]

因为：AH等于SN，且EL等于MR，

所以：SN与MR也是不可公度的。

因为：SN比MR如同PN比NR，[VI. 1]

所以：PN与NR是不可公度的。

因为：PN等于MN，且NR等于NO，

所以：MN与NO是不可公度的。

因为：MN上的正方形与NO上的正方形是可公度的，

且每一个都是有理的。

所以：MN、NO是仅正方可公度的有理线段，

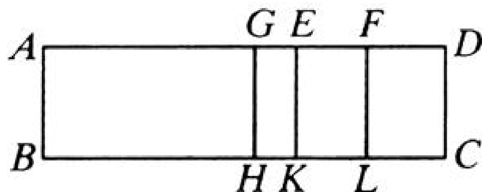
因此：MO是二项线[X. 36]，且它是AC的“边”。

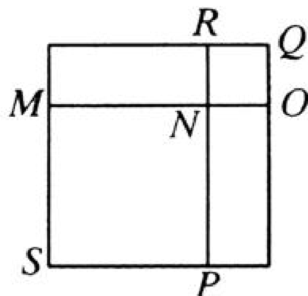
证完。

命题55

…

假如有一条有理线段与第二二项线围成一个面，那么这个面的边是被称为第一双中项线的无理线段。





设：有理线段AB和第二二项线AD围成面$ABCD$。

那么可以说：AC的边是一个第一双中项线。

因为：AD是一个第二二项线，

那么，设：点E分AD为它的两段，其中AE是长段。

因为：AE、ED是仅正方可公度的两有理线段，

且AE上的正方形比ED上的正方形大一个与AE是可公度的线段上的正方形，

而短线段ED与AB是长度可公度的，[X. 定义II. 2]

设：点F平分ED，并在AE上贴合缺少一个正方形的矩形AG、GE，使其等于EF上的正方形，

所以：AG与GE是长度不可公度的。[X. 17]

设：通过G、E、F引GH、EK、FL平行于AB、CD，

画出正方形SN等于平行四边形AH，正方形NQ等于GK，

并且MN与NO在一直线上，因此RN与NP也在一直线上。

完全画出正方形SQ。

由于已经证明：MR是SN、NQ的比例中项，且等于EL，而MO是面AC的边。

现在证明：MO是第一双中项线。

因为：AE与ED是长度不可公度的，

ED与AB是不可公度的，

因此：AE与AB也是不可公度的。[X. 13]

因为：AG与EG是可公度的，

所以：AE与两线段AG、GE每一个也是可公度的。[X. 15]

因为：AE与AB是长度不可公度的，

因此：AG、GE与AB也都是不可公度的，[X. 13]

所以：BA、AG和BA、GE是两对仅正方可公度的有理线段，

因此：两矩形AH、GK都是中项面，[X. 21]

所以：两正方形SN、NQ也都是中项面，

因此：MN、NO都是中项线。

因为：AG与GE是长度可公度的，

所以：AH与GK也是可公度的，[VI. 1，X. 11]，

也就是SN与NQ是可公度的，

那么MN上的正方形与NO上的正方形可公度。

因为：AE与ED是长度不可公度的，

且AE与AG是可公度的，ED与EF是可公度的，

所以：AG与EF是不可公度的，[X. 13]

所以：AH与EL是不可公度的，

也就是SN与MR不可公度，即PN与NR不可公度，[VI. 1，X. 11]

也就是MN与NO是长度不可公度的。

又因，已经证明：MN、NO是两中项线，并且是正方可公度的，

因此：MN、NO是仅正方可公度的两中项线。

接下来可以证明：由MN、NO围成的矩形是有理面。

根据假设：DE与两线段AB、EF每一个是可公度的，

所以：EF与EK也是可公度的。[X. 12]

因为：它们都是有理的，

所以：EL，也就是MR也是有理的，[X. 19]

因此：MR是矩形MN、NO。

因为：当以两个仅正方可公度的中项线围成的矩形是有理的，那么两中项线的和是无理的，称此线为第一双中项线，[X. 37]

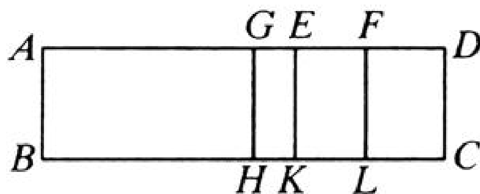
所以：*MO*是一个第一双中项线。

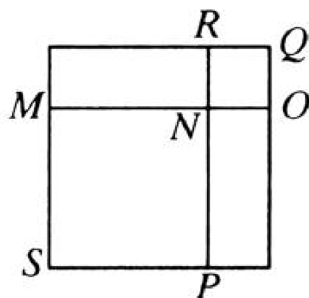
证完。

命题56

…

假如由一条有理线段和第三二项线围成一个面，那么这个面的边是一个称为第二双中项线的无理线段。





设：有理线段*AB*和第三二项线*AD*围成面*ABCD*，

*E*分*AD*为它的两段，其中*AE*是大段。

那么可以说：面*AC*的边是一个被称为第二双中项线的无理线段。

同前面作图。

因为：*AD*是一个第三二项线，

因此：*AE*、*ED*是仅正方可公度的两有理线段，

且*AE*上的正方形比*ED*上的正方形大一个与*AE*是可公度的线段上的正方形，

且*AE*、*ED*每一个与*AB*是长度不可公度的。[X. 定义II. 3]

同理可证：MO是面AC的边，而MN、NO是仅正方可公度的两中项线，

因此：MO是一个双中项线。

接下来可以证明：MO是一个第二双中项线。

因为：DE与AB，也就是DE与EK是长度不可公度的，

且DE与EF是可公度的，

所以：EF与EK是长度不可公度的。[X. 13]

因为：它们都是有理的，

因此：FE、EK是仅正方可公度的两有理线段，

所以：EL也就是MR是中项面。[X. 21]

因为：它是由MN、NO所围成的，

所以：矩形MN、NO是中项面，

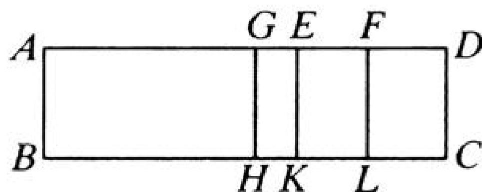
因此：MO是一个第二双中项线。[X. 38]

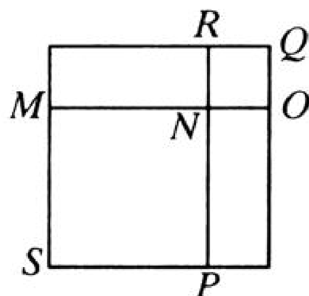
证完。

命题57

…

假如由一条有理线段与第四二项线围成一个面，那么这个面的边是被称为主线的无理线段。





设：由有理线段*AB*和第四二项线*AD*围成面*AC*，

并且*E*将*AD*分为两段，其中*AE*是大段。

那么可以说：*AC*的边是被称为主线的无理线段。

因为：*AD*是一个第四二项线，

所以：*AE*、*ED*是仅正方可公度的两有理线段，

并且*AE*上的正方形比*ED*上的正方形大一个与*AE*是不可公度的线段上的正方形。

因为：*AE*与*AB*是长度可公度的，[X. 定义II. 4]

设：*F*平分*DE*，

在*AE*上贴合矩形*AG*、*GE*等于*EF*上的正方形，

因此：*AG*与*GE*是长度不可公度的。[X. 18]

引*GH*、*EK*、*FL*平行于*AB*，

作图如前，

所以：显然*MO*是*AC*的边。

接下来可以证明：*MO*是被称为主线的无理线段。

因为：*AG*与*EG*是不可公度的，

所以：*AH*与*GK*也是不可公度的，也就是*SN*与*NQ*不可公度，[VI.

1，X. 11]

因此：MN、NO是正方不可公度的。

因为：AE与AB是可公度的，

所以：AK是有理面。[X. 19]

又因：它等于MO、NO上的正方形的和，

因此：MN、NO上的正方形的和也是有理的。

因为：DE与AB，也就是DE与EK是长度不可公度的，

且DE与EF可公度，

所以：EF与EK是长度不可公度的，[X. 13]

所以：EK、EF是仅正方不可公度的两有理线段，

因此：LE也就是MR是中项面。[X. 21]

又因：它是由MN、NO围成的，

所以：矩形MN、NO是中项面。

又MN、NO上的正方形的和是有理面，且MN、NO是正方不可公度，

因为：倘若正方不可公度的两线段上的正方形的和是有理的，并且由它们围成的矩形是中项面，

那么：这二线段的和是无理的，称此线为主线，[X. 39]

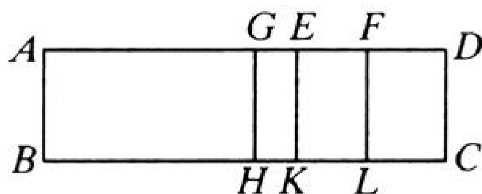
因此：MO是被称为主线的无理线段，且它是面AC的“边”。

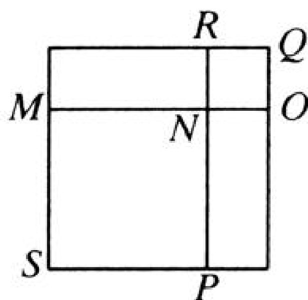
证完。

命题58

…

倘若由一有理线段与第五二项线围成一个面，那么这个面的边是一个称为中项面有理面和的边的无理线段。





设：由有理线段*AB*和第五二项线*AD*围成面*AC*，并且*E*将*AD*分为两段，其中*AE*是大段。

那么可以说：*AC*的边是称为中项面有理面和的边的无理线段，

同上作图：*MO*是面*AC*的边。

要求证明：*MO*是一个中项面有理面和的边。

因为：*AG*与*GE*是不可公度的，[X. 18]

所以：*AH*与*HE*也是不可公度的，[VI. 1，X. 11]

也就是*MN*上的正方形与*NO*上的正方形是不可公度的，

因此：*MN*、*NO*是正方不可公度的。

因为：*AD*是一个第五二项线，其中*ED*是小段，

所以：*ED*与*AB*是长度不可公度的。[X. 定义II. 5]

因为：*AE*与*ED*不可公度，

所以：*AB*与*AE*也是长度不可公度的，[X. 13]

因此：*AK*，也就是*MN*、*NO*上的正方形的和是中项面。[X. 21]

因为：*DE*与*AB*，也就是与*EK*，是长度不可公度的，

而*DE*与*EF*是可公度的，

所以：*EF*与*EK*也是可公度的。[X. 12]

因为：*EK*是有理的，

因此：*EL*，也就是*MR*，也就是矩形*MN*、*NO*也是有理的，[X. 19]

因此：*MN*、*NO*是正方不可公度的线段，

它们上的正方形的和是中项面，但它们围成的矩形是有理面，

所以：*MO*是中项面有理面和的边，[X. 40]

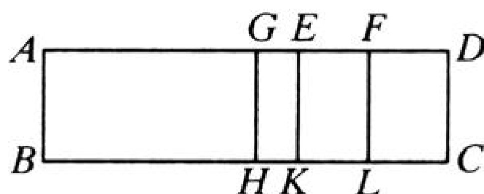
它们是面*AC*的边。

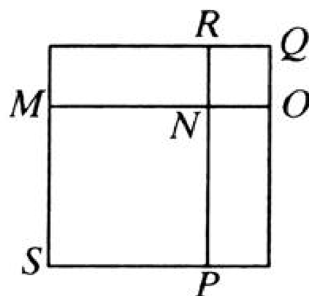
证完。

命题59

…

假如由一有理线段与第六二项线围成一个面，那么这个面的边是称为两中项面和的边的无理线段。





设：有理线段*AB*和第六二项线*AD*围成面*ABCD*，

且点*E*将*AD*分为两段，其中*AE*是大段。

那么可以说：AC的边是两中项面和的边。

同上作图：MO是AC的边，且MN与NO是正方不可公度的。

因为：EA与AB是长度不可公度的，

所以：EA、AB是仅正方可公度的两有理线段，

因此：AK也就是MN、NO上的正方形的和是中项面。[X. 21]

因为：ED与AB是长度不可公度的，

所以：FE与EK也是不可公度的，[X. 13]

所以：FE、EK是仅正方可公度的两有理线段，

因此：EL也就是MR，也就是矩形MN、NO是中项面。[X. 21]

因为：AE与EF是不可公度的，

所以：AK与EL也是不可公度的。[VI. 1，X. 11]

因为：AK是MN、NO上的正方形的和，且EL是矩形MN、NO，

所以：MN、NO上的正方形的和与矩形MN、NO是不可公度的。

又因：它们都是中项面，且MN、NO是正方不可公度的，

因此：MO是两中项面和的边，[X. 41]

且它是AC的边。

证完。

引理

…

假如一条线段分为不相等的两段，那么两段上的正方形的和大于由两段

围成的矩形的二倍。



设：已知线段AB，而AB被点C分为两不等线段，其中AC是大段。

那么可以说：AC、CB上的正方形的和大于二倍的矩形AC、CB。

那么：令AB被D平分。

因为：一线段在点D被分为相等的两段，在点C被分为不相等的两段，

那么：矩形AC、CB加CD上的正方形等于AD上的正方形，[II. 5]

所以：矩形AC、CB小于AD上的正方形，

因此：二倍的矩形AC、CB小于AD上的正方形的二倍。

因为：AC、CB上的正方形的和等于AD、DC上的正方形的和的二倍，

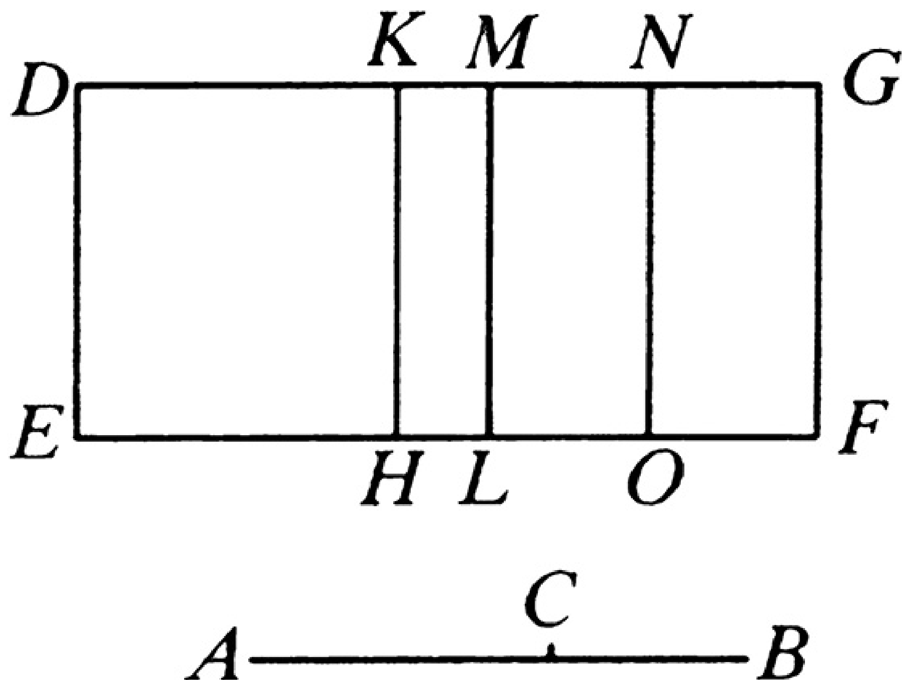
所以：AC、CB上的正方形的和大于二倍的矩形AC、CB。[II. 9]

证完。

命题60

…

假如对一条有理线段上贴合一矩形，使其与一个二项线上的正方形相等，那么所产生的宽是第一二项线。



设：已知*AB*是一个二项线，而*C*将*AB*分为两段，其中*AC*是大段。

并在有理线段*DE*上贴合一矩形*DEFG*等于*AB*上的正方形，产生出*DG*为宽。

那么可以说：*DG*是第一二项线。

因为：假如在*DE*上贴合矩形*DH*，使其等于*AC*上的正方形，且*KL*等于*BC*上的正方形，

那么：余量，也就是二倍矩形*AC*、*CB*等于*MF*。

设：*MG*被*N*平分，且*NO*平行于*ML*或者*GF*，

因此：两矩形*MO*、*NF*的每一个等于矩形*AC*、*CB*。

因为：*AB*是二项线，且*C*分*AB*为它的两段，

所以：*AC*、*CB*是仅正方可公度的两有理线段，[X. 36]

因此：*AC*、*CB*上的正方形都是有理的，并且可以彼此公度，

因此：AC、CB上的正方形的和也是有理的。[X. 15]

因为：这个和等于DL，

所以：DL是有理的。

又因：它是贴合于有理线段DE上的，

所以：DM是有理的，且与DE是长度可公度的。[X. 20]

因为：AC、CB是仅正方可公度的两有理线段，

因此：二倍的矩形AC、CB，也就是MF，是中项面。[X. 21]

因为：它贴合于有理线段ML上，

所以：MG也是有理的，并且与ML，也就是DE是长度不可公度的。[X. 22]

因为：MD是有理的，与DE是长度可公度的，

所以：DM与MG是长度不可公度的。[X. 13]

因为：它们都是有理的，

因此：DM、MG是仅正方可公度的两有理线段，

所以：DG是二项线。[X. 36]

接下来可以证明：DG也是第一二项线。

因为：矩形AC、CB是AC、CB上两正方形的比例中项，[X. 53后的引理]

因此：MO也是DH、KL的比例中项，

所以：DH比MO如同MO比KL，

也就是DK比MN如同MN比MK，[VI. 1]

所以：矩形DK、KM等于MN上的正方形。[VI. 17]

因为：AC、CB上的两正方形是可公度的，

因此：DH与KL也是可公度的，

所以：DK与KM也是可公度的。[VI. 1，X. 11]

因为：AC、CB上的正方形的和大于二倍矩形AC、CB，[引理]

所以：DL大于MF，

因此：DM大于MG。[VI. 1]

因为：矩形DK、KM等于MN上的正方形，

也就是等于MG上的正方形的四分之一，并且DK与KM是可公度的，

因为：假如有两不等线段，在大线段上贴合一个缺少一正方形且等于小线段上的正方形的四分之一的矩形，如果分大线段之两部分是长度可公度的，那么大线段上的正方形比小线段上的正方形大一个与大线段是可公度的线段上的正方形，[X. 17]

因此：DM上的正方形比MG上的正方形大一个与DM是可公度的线段上的正方形。

又因：DM、MG都是有理的，

且大线段DM与已给的有理线段DE是长度可公度的，

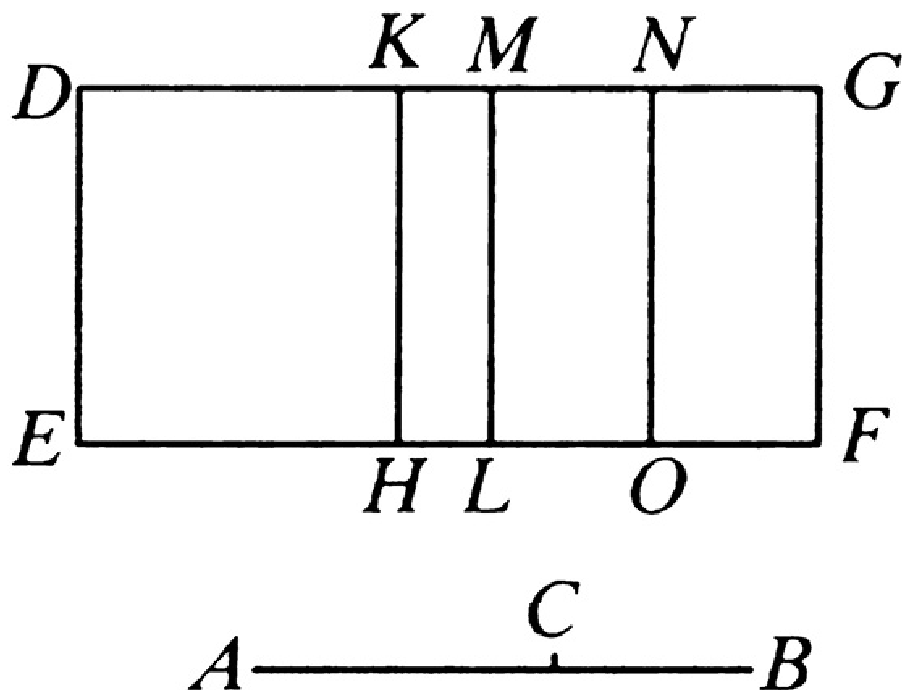
所以：DG是一个第一二项线。[X. 定义II. 1]

证完。

命题61

…

假如对一条有理线段贴合一矩形与一个第一双中项线上的正方形相等，那么所产生的宽是第二二项线。



设：AB是第一双中项线，并于点C分为两段，其中AC是大段，

又给出有理线段DE，并在DE上贴合矩形DF等于AB上的正方形，将产生出的DG作为宽。

那么可以说：DG是一个第二二项线。

同上作图。

因为：AB是分于点C的一个第一双中项线，

因此：AC、CB是仅正方形可公度的二中项线，

且它们构成一个有理矩形，[X. 37]

所以：AC、CB上的正方形也是中项面，[X. 21]

所以：DL是中项面。[X. 15和23，推论]

又因：它被贴合于有理线段DE上，

因此：MD是有理的，并且与DE是长度不可公度的。[X. 22]

因为：二倍的矩形AC、CB是有理的，

所以：MF也是有理的。

又因：它是作在有理线段ML上，

所以：MG也是有理的，并与ML，也就是DE是长度可公度的，[X. 20]

因此：DM与MG是长度不可公度的。[X. 13]

因为：它们是有理的，

所以：DM、MG是仅正方可公度的有理线段，

所以：DG是二项线。[X. 36]

接下来可以证明：DG是一个第二二项线。

因为：AC、CB上的正方形的和大于二倍的矩形AC、CB，

所以：DL大于MF，

因此：DM大于MG。[VI. 1]

因为：AC上的正方形与CB上的正方形是可公度的，DH与KL也是可公度的，

所以：DK与KM也是可公度的。[VI. 1，X. 11]

因为：矩形DK、KM等于MN上的正方形，

因此：DM上的正方形比MG上的正方形大一个与DM是可公度的线段上的正方形。[X. 17]

因为：MG与DE是长度可公度的，

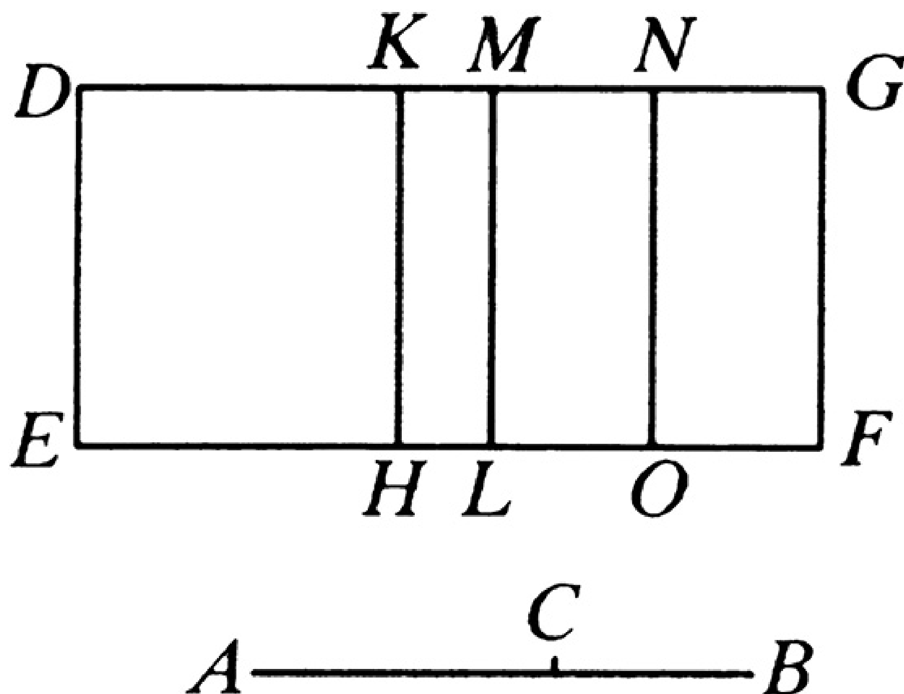
所以：*DG*是一个第二二项线。[X. 定义II. 2]

证完。

命题62

…

假如对一条有理线段贴合一矩形与一个第二双中项线上的正方形相等，那么所产生的宽是第三二项线。



设：已知*AB*是第二双中项线，且被点*C*分为两段，其中*AC*是大段，

并且，已知*DE*是有理线段，并在*DE*上贴合矩形*DF*等于*AB*上的正方形，将产生出的*DG*作为宽。

那么可以说：*DG*是一个第三二项线。

由上作图。

因为：AB是分于点C的第二双中项线，

所以：AC、CB是仅正方可公度的二中项线，

并且它们围成的矩形是中项面，[X. 38]

所以：AC、CB上的正方形的和也是中项面。[X. 15和23，推论]

因为：它等于DL，

所以：DL也是中项面。

又因：它是作在有理线段DE上，

所以：MD也是有理的，且与DE是长度不可公度的。[X. 22]

同理：MG也是有理的，并且与ML，也就是DE是长度不可公度的。

因此：线段DM、MG的每一个都是有理的，且与DE是长度不可公度的。

因为：AC与CB是长度不可公度的，

且AC比CB如同AC上的正方形比矩形AC、CB，

所以：AC上的正方形与矩形AC、CB也是不可公度的，[X. 11]

所以：AC、CB上的正方形的和与二倍的矩形AC、CB是不可公度的，[X. 12，13]

因此：DL与MF是不可公度的，

所以：DM与MG也是不可公度的。[VI. 1，X. 11]

因为：它们是有理的，

因此：DG是二项线。

接下来可以证明：它也是第三二项线。

类似前述，可断定*DM*大于*MG*，且*DK*与*KM*是可公度的。

因为：矩形*DK*、*KM*等于*MN*上的正方形，

因此：*DM*上的正方形比*MG*上的正方形大一个与*DM*是可公度的线段上的正方形。

因为：线段*DM*、*MG*的每一个与*DE*都不是长度可公度的，

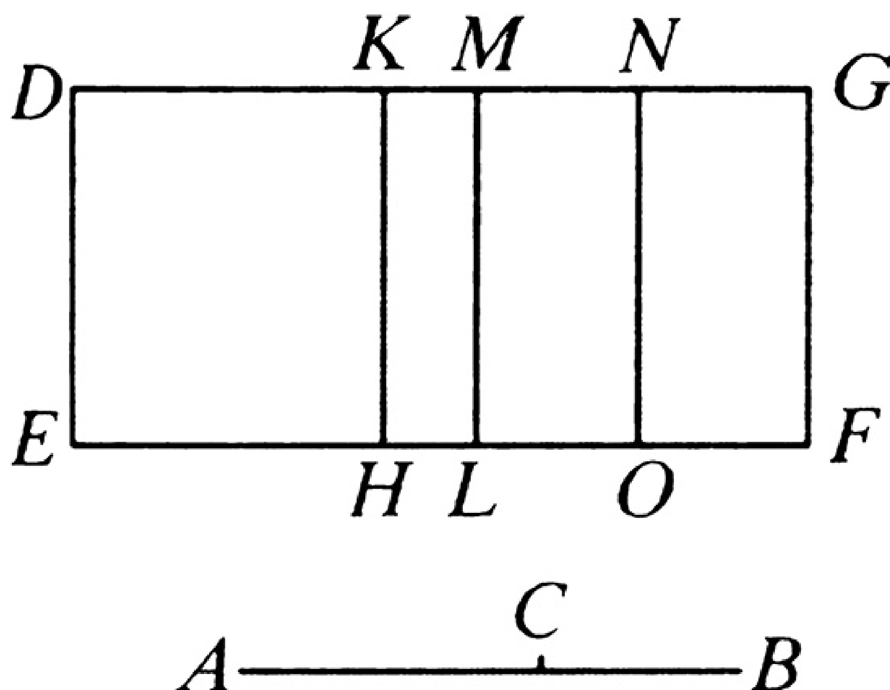
所以：*DG*是一个第三二项线。[X. 定义II. 3]

证完。

命题63

…

假如对一条有理线段上贴合一矩形与一条主线上的正方形相等，那么所产生的宽是第四二项线。



设：AB是一条主线，且被点C分为两段，其中AC大于CB，

并且已知DE是有理线段，在DE上贴合一矩形DF，等于AB上的正方形，产生出的DG为宽。

那么可以说：DG是第四二项线。

同上作图。

因为：AB是主线，并被点C分为两段，

所以：AC、CB是正方不可公度的两线段，且它们上的正方形的和是有理的，由它们围成的矩形是中项面。[X. 39]

因为：AC、CB上的正方形的和是有理的，

所以：DL是有理的，

因此：DM也是有理的，并且与DE是长度可公度的。[X. 20]

又因：二倍的矩形AC、CB，也就是MF是中项面，

且它贴合于有理线段ML上，

所以：MG也是有理的，并与DE是长度不可公度的，[X. 22]

因此：DM与MG是长度不可公度的，[X. 13]

因此：DM、MG是仅正方可公度的有理线段，

所以：DG是二项线。[X. 36]

接下来可以证明：DG也是一个第四二项线。

同理可证：DM大于MG，矩形DK、KM等于MN上的正方形。

因为：AC上的正方形与CB上的正方形是不可公度的，

因此：DH与KL也是不可公度的，

所以：*DK*与*KM*也是不可公度的。[VI. 1，X. 11]

因为：假如有两个不相等的线段，在线段贴合一缺少一个正方形且等于小线段上的正方形的四分之一的矩形，并且分它为不可公度的两部分，

那么大线段上的正方形比小线段上的正方形大一个与大线段不可公度的线段上的正方形，[X. 18]

因此：*DM*上的正方形比*MG*上的正方形大一个与*DM*是不可公度的线段上的正方形。

因为：*DM*、*MG*是仅正方可公度的两有理线段，

且*DM*与所给定的有理线段*DE*是可公度的，

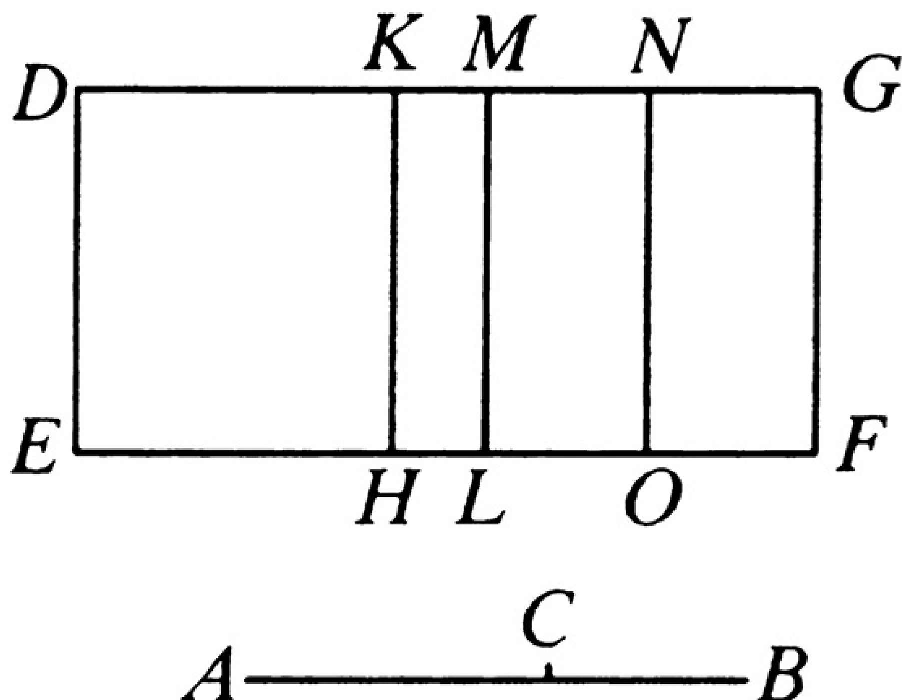
所以：*DG*是一个第四二项线。[X. 定义II. 4]

证完。

命题64

…

假如对一条有理线段贴合一矩形，与一个中项面有理面和的边上的正方形相等，那么所产生的宽是第五二项线。



设：已知AB是中项面有理面和的边，并被点C分为两段，其中AC大于CB。

且已知DE是有理线段，在DE上贴合矩形DF等于AB上的正方形，产生出的DG为宽。

那么可以说：DG是一个第五二项线。

由上作图。

因为：AB是分于点C点的中项有理面的边，

因此：AC、CB是正方形不可公度的两线段，它们上的正方形的和是中线面，而由它们围成的矩形是有理的。[X. 40]

因为：AC、CB上的正方形的和是中项面，

所以：DL是中项面，

因此：DM是有理的，并与DE是长度不可公度的。[X. 22]

因为：二倍的矩形AC、CB，也就是MF是有理的，

因此：MG是有理的，并与DE可公度，[X. 20]

所以：DM与MG是不可公度的，[X. 13]

所以：DM、MG是仅正方可公度的两有理线段，

因此：DG是二项线。[X. 36]

接下来可以证明：它也是一个第五二项线。

同理可证：矩形DK、KM等于MN上的正方形，而DK与KM是长度不可公度的。

因此：DM上的正方形比MG上的正方形大一个与DM是不可公度的线段上的正方形，[X. 18]

所以：DM、MG是仅正方可公度的，而小线段MG与DE是长度可公度的，

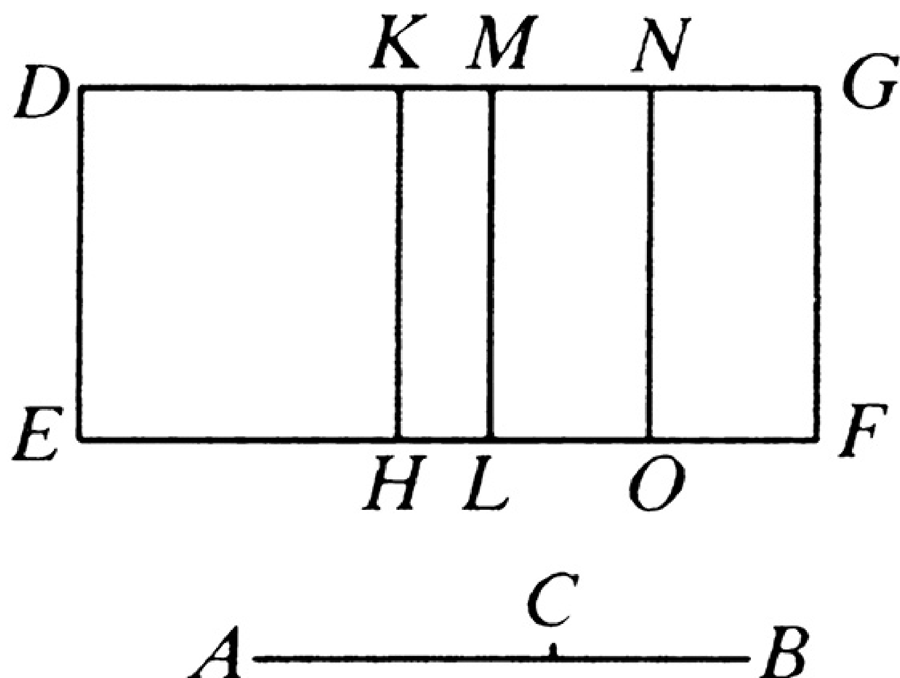
所以：DG是一个第五二项线。[X. 定义II. 5]

证完。

命题65

…

假如对一条有理线段贴合一矩形与一个两中项面和的边上的正方形相等，那么所产生的宽是第六二项线。



设：已知*AB*是一个两中项面和的边，并被点*C*分为两段，

且已知有理线段*DE*，在*DE*上贴合矩形*DF*等于*AB*上的正方形，产生出的*DG*为宽。

那么可以说：*DG*是第六二项线。

由上作图。

因为：*AB*是被分于点*C*的两中项面和的边，

因此：*AC*、*CB*是正方不可公度的两线段，它们上的正方形的和是中项面，由它们围成的矩形是中项面，并且它们上的正方形的和与以它们围成的矩形是不可公度的。[X. 41]

同上可证：两矩形*DL*、*MF*都是中项面。

又因：它们贴合于有理线段*DE*，

所以：每一条线段*DM*、*MG*是有理的，并且与*DE*是长度不可公度的。[X. 22]

因为：*AC*、*CB*上的正方形的和与二倍的矩形*AC*、*CB*是不可公度的，

所以：*DL*与*MF*是不可公度的，

因此：*DM*与*MG*也是不可公度的，[VI. 1，X. 11]

因此：*DM*、*MG*是仅正方可公度的两有理线段，

所以：*DG*是二项线。[X. 36]

接下来可以证明：它也是一个第六二项线。

同理可证：矩形*DK*、*KM*等于*MN*上的正方形，且*DK*与*KM*是长度不可公度的。

同理：*DM*上的正方形比*MG*上的正方形大一个与*DM*是长度不可公度的线段上的正方形。

又因：线段*DM*、*MG*两者与所给定的有理线段*DE*都不是长度可公度的，

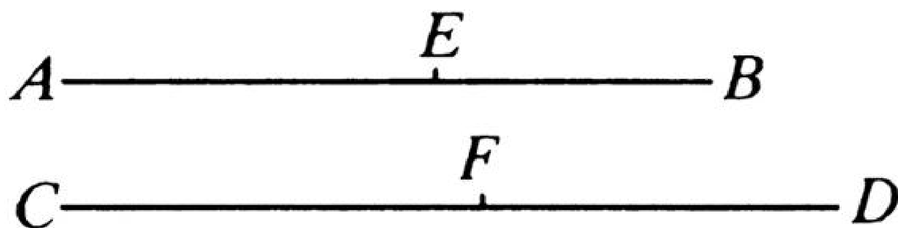
所以：*DG*是一个第六二项线。[X. 定义II. 6]

证完。

命题66

…

与一个二项线是长度可公度的线段本身也是二项线，且是同级的。



设：已知AB是二项线，且与CD是长度可公度的。

那么可以说：CD是二项线，并与AB同级。

因为：AB是二项线，

那么，设：点E将AB分为两段，其中AE是大段，

因此：AE、EB是仅正方可公度的两有理线段。[X. 36]

作比例：AB比CD如同AE比CF，[VI. 12]

所以：余量EB比余量FD如同AB比CD。[V. 19]

因为：AB与CD是长度可公度的，

所以：AE与CF，且EB与FD都是长度可公度的。[X. 11]

因为：AE、EB是有理的，

因此：CF、FD也是有理的。

因为：AE比CF如同EB比FD，[V. 11]

那么，由更比：AB比EB如同CF比FD。[V. 16]

因为：AE、EB是仅正方可公度的，

所以：CF、FD也是仅正方可公度的。[X. 11]

因为：它们是有理的，

所以：CD是二项线。[X. 36]

接下来可以证明：CD与AB是同级的。

因为：AE上的正方形比EB上的正方形大一个与AE要么可公度，要么不可公度的线段上的正方形，

设：此时AE上的正方形比EB上的正方形大一个与AE是可公度的线

段上的正方形，

那么：CF上的正方形也将比FD上的正方形大一个与CF也是可公度的线段上的正方形。[X. 14]

设：AE与给定的有理线段是可公度的，

那么：CF与给定的有理线段也是可公度的，[X. 12]

所以：线段AB、CD都是第一二项线，它们是同级的。[X. 定义II. 1]

设：EB与给定的有理线段是可公度的，那么FD与给定的有理线段也是可公度的，[X. 12]

所以：CD与AB同级，

都是第二二项线。[X. 定义II. 2]

设：线段AE、EB的每一个与所设有理线段都不是可公度的，那么线段CF、FD每一个与所设有理线段也是不可公度的，[X. 13]

因此：AB、CD都是第三二项线。[X. 定义II. 3]

设：AE上的正方形比EB上的正方形大一个与AE是不可公度的线段上的正方形，

那么：CF上的正方形比FD上的正方形也大一个与CF是不可公度的线段上的正方形。[X. 14]

假如：AE与所设有理线段是可公度的，那么CF与所设有理线段也是可公度的，

因此：AB、CD都是第四二项线。[X. 定义II. 4]

设：EB与所设有理线段是可公度的，那么FD也是如此，

因此：两线段AB、CD都是第五二项线，[X. 定义II. 5]

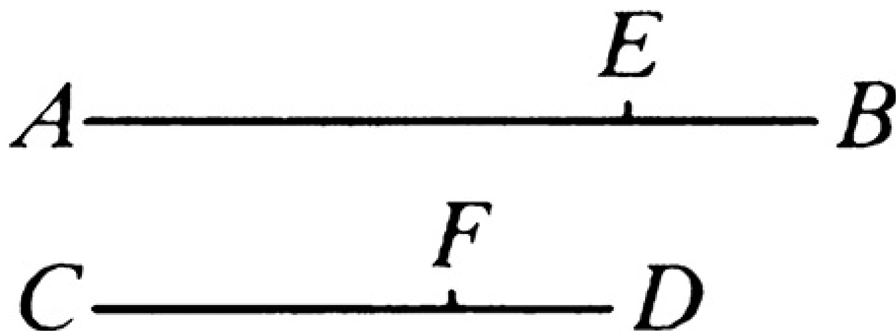
所以：与二项线是长度可公度的线段是同级的二项线。

证完。

命题67

…

与一个双中项是长度可公度的线段本身也是双中项线，并且是同级的。



设：已知*AB*是双中项线，且与线*CD*是长度可公度的。

那么可以说：*CD*也是双中项线，并与*AB*同级。

因为：*AB*是双中项线，

那么，设：*AB*被点*E*分为两个中项线，

因此：*AE*、*EB*是仅正方可公度的两中项线。[X. 37. 38]

作比例：使得*AB*比*CD*如同*AE*比*CF*，

因此：有余量*EB*比余量*FD*如同*AB*比*CD*。[V. 19]

因为：*AB*与*CD*是长度可公度的，

所以：*AE*、*EB*分别与*CF*、*FD*是可公度的。[X. 11]

因为：*AE*、*EB*是中项线，

所以：*CF*、*FD*也是中项线。[X. 23]

因为：AE比EB如同CF比FD，[V. 11]

且AE、EB是仅正方可公度的，

因此：CF、FD也是仅正方可公度的。[X. 11]

又因，已经证明：它们是中项线，

因此：CD是双中项线。

接下来可以证明：CD与AB是同级的。

因为：AE比EB如同CF比FD，

所以：AE上的正方形比矩形AE、EB如同CF上的正方形比矩形CF、FD，

由更比：有AE上的正方形比CF上的正方形如同矩形AE、EB比矩形CF、FD。[V. 16]

因为：AE上的正方形与CF上的正方形是可公度的，

所以：矩形AE、EB与矩形CF、FD也是可公度的。

设：矩形AE、EB是有理的，

那么：矩形CF、FD也是有理的。

因为：CD是第一个第一中项线，[X. 37]

设：矩形AE、EB是中项面，

那么：矩形CF、FD也是中项面，[X. 23，推论]

所以：AC、CD都是第二中项线，[X. 38]

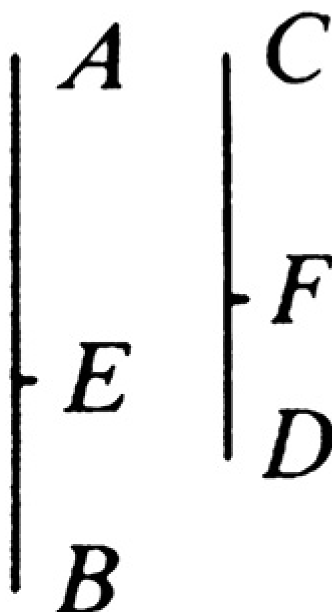
因此：AB与CD是同级的双中项线。

证完。

命题68

…

与一主线可公度的线段本身也是主线。



设：已知*AB*是主线，而*AB*与*CD*是可公度的。

那么可以说：*CD*是主线。

设：*E*将*AB*分为两段，

因此：*AE*、*EB*是正方不可公度的两线段，它们上的正方形的和是有理的，但是由它们围成的矩形是中项面。[X. 39]

如上作图。

因为：*AB*比*CD*如同*AE*比*CF*，且如同*EB*比*FD*，

因此：*AE*比*CF*如同*EB*比*FD*。[V. 11]

因为：*AB*与*CD*是可公度的，

所以：AE、EB分别与CF、FD也是可公度的。[X. 11]

因为：AE比CF如同EB比FD，

由更比：有AE比EB如同CF比FD，[V. 16]

由合比：有AB比BE如同CD比FD，[V. 18]

因此：AB上的正方形比BE上的正方形如同CD上的正方形比DF上的正方形。[VI. 20]

同理可证：AB上的正方形比AE上的正方形也如同CD上的正方形比CF上的正方形。

所以：AB上的正方形比AE、EB上的正方形的和如同CD上的正方形比CF、FD上的正方形的和。

由更比：有AB上的正方形比CD上的正方形如同AE、EB上的正方形的和比CF、FD上的正方形的和。[V. 16]

因为：AB上的正方形与CD上的正方形是可公度的，

因此：AE、EB上的正方形的和与CF、FD上的正方形的和也是可公度的。

因为：AE、EB上的正方形的和是有理的，[X. 39]

所以：CF、FD上的正方形的和是有理的。

同理：有二倍的矩形AE、EB与二倍的矩形CF、FD是可公度的。

因为：二倍的矩形AE、EB是中项面，

所以：二倍的矩形CF、FD也是中项面，[X. 23，推论]

所以：CF、FD是正方不可公度的两线段，它们上的正方形的和是有理的，由它们围成的矩形是中项面，

因此：整体CD是被称为主线的无理线段，[X. 39]

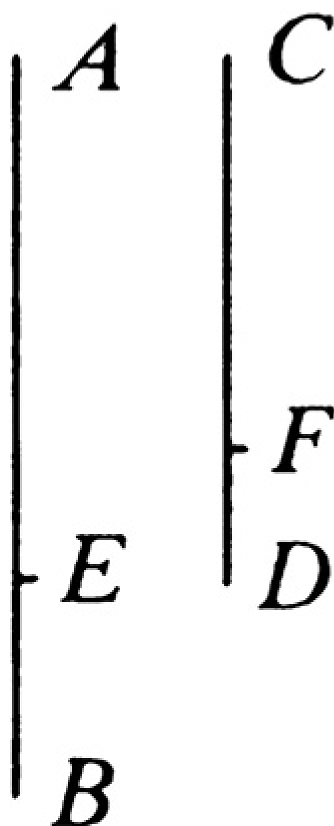
因此：与主线可公度的线段是主线。

证完。

命题69

…

与一中项面有理面和的边可公度的线段也是中项面有理面和的边。



设：AB是中项面有理面和的边，且AB与CD可公度。

那么可以说：CD也是中项面有理面和的边。

设：点E将AB分为两线段，

所以：AE、EB是正方不可公度的线段，且它们上的正方形的和是中

项面，

但是由它们围成的矩形是有理面。[X. 40]

由上作图。

同理可证：*CF*、*FD*是正方不可公度的，

且*AE*、*EB*上的正方形的和与*CF*、*FD*上的正方形的和是可公度的，

而矩形*AE*、*EB*与矩形*CF*、*FD*是可公度的，

因此：*CF*、*FD*上的正方形的和也是中项面，且矩形*CF*、*FD*是有理的，

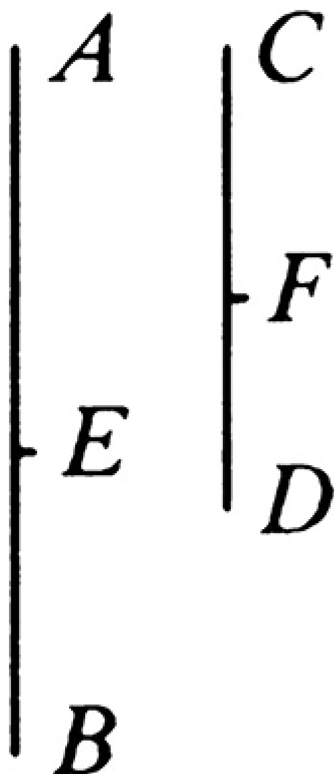
所以：*CD*是一个中项面有理面和的边。

证完。

命题70

…

与一两中项面和的边可公度的线段也是两中项面和的边。



设：已知AB是两中项面和的边，且AB与CD是可公度的。

那么可以说：CD也是一个两中项面和的边。

因为：AB是两中项面和的边，

那么，设：点E将AB分为两段，

因此：AE、EB是正方不可公度的两线段，

并且它们上的正方形的和是中项面，它们围成的矩形是中项面，

所以：AE、EB上的正方形的和与矩形AE、EB是不可公度的。[X. 41]

由上作图。

同理可证：CF、FD也是正方不可公度的，而AE、EB上的正方形的和与CF、FD上的正方形的和是可公度的。

因为：矩形AE、EB与矩形CF、FD是可公度的，

所以：CF、FD上的正方形的和及矩形CF、FD都是中项面。

又因：CF、FD上的正方形的和与矩形CF、FD是不可公度的，

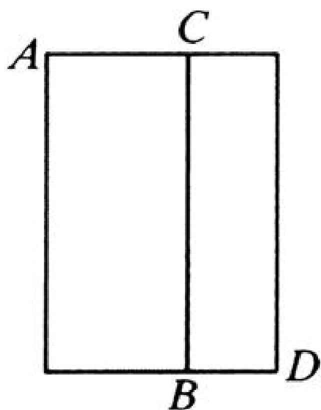
因此：CD是一个两中项面和的边。

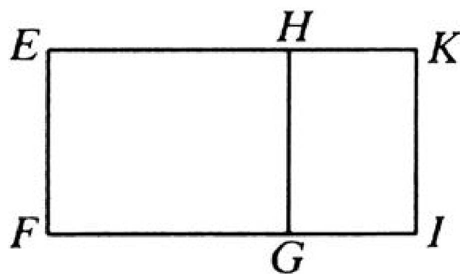
证完。

命题71

…

假如一有理面和一中项面相加，那么可以产生四个无理线段，也就是一个二项线或者一个第一双中项线，或者一条主线或者一个中项面有理面和的边。





设：AB是有理面，CD是中项面。

那么可以说：AD面的边是一个二项线，或者是第一双中项线，或者是一条主线，或者是一个中项面有理面和的边。

因为：AB要么大于CD，要么小于CD。

先设：AB大于CD。

已知有理线段EF，在EF上贴合一个矩形EG等于AB，产生出作为宽的EH；

并在EF上贴合一个矩形HI等于DC，产生出作为宽的HK。

因为：AB是有理面，等于EG，

所以：EG也是有理面。

因为：它是贴合于EF上的，产生出作为宽的EH，

所以：EH是有理的，且与EF是长度可公度的。[X. 20]

因为：CD是中项面，等于HI,

因此：HI是中项面。

并且它是贴合在有理线段EF上，产生出作为宽的HK，

所以：HK是有理的，且与EF是长度不可公度的。[X. 22]

因为：CD是中项面，且AB是有理面，

所以：AB与CD是不可公度的，

因此：EG与HI也是不可公度的。

因为：EG与HI如同EH比HK，[VI. 1]

所以：EH与HK也是长度不可公度的。[X. 11]

又因：二者都是有理的，

所以：EH、HK是仅正方可公度的两有理线段，

因此：EK是一个被分于点H的二项线。[X. 36]

因为：AB大于CD，而AB等于EG，CD等于HI,

那么：EG大于HI，

所以：EH大于HK，

因此：EH上的正方形比HK上的正方形大一个与EH要么是长度可公度的，要么是不可公度的线段上的正方形。

先设：EH上的正方形比HK上的正方形大一个与EH是长度可公度的线段上的正方形，

因为：大线段HE与给定有理线段EF是长度可公度的，

所以：EK是一个第一二项线。[X. 定义II. 1]

因为：EF是有理的，

且倘若由一条有理线段与第一二项线围成一个矩形面，那么此面的边是二项线，[X. 54]

所以：EI的边是二项线，

因此：AD的边也是二项线。

再设：EH上的正方形比HK上的正方形大一个与EH是不可公度的线段上的正方形。

因为：大线段EH与给出的有理线段EF是长度可公度的，

因此：EK是一个第四二项线。[X. 定义II. 4]

又因：EF是有理的，

且倘若由有理线段和第四二项线围成一个矩形面，那么此面的边是被称为主线的无理线段，[X. 57]

因此：面EI的边是主线，

所以：面AD的边也是主线。

再设：AB小于CD，

那么：*EG*小于*HI*，因此*EH*小于*HK*。

因为：此时*HK*上的正方形比*EH*上的正方形大一个与*HK*要么是可公度的，要么是不可公度的线段上的正方形，

先设：*HK*上的正方形比*EH*上的正方形大一个与*HK*是长度可公度的线段上的正方形，

因为：小线段*EH*与给出的有理线段*EF*是长度可公度的，

所以：*EK*是一个第二二项线。[X. 定义II. 2]

因为：*EF*是有理的，

且倘若由有理线段和第二二项线围成一个矩形面，

那么此面的边是一个第一双中项线，[X. 55]

因此：面*EI*的边是一个第一双中项线，

所以：面*AD*的边也是一个第一双中项线。

再假设：*HK*上的正方形比*HE*上的正方形大一个与*HK*是不可公度的线段上的正方形。

因为：小线段*EH*与给出的有理线段*EF*是可公度的，

所以：*EK*是一个第五二项线。[X. 定义II. 5]

又因：*EF*是有理的，

且倘若由有理线段和第五二项线围成一个矩形面，那么这个面的边是一个中项面有理面和的边，[X. 58]

所以：面*EI*的边是一个中项面有理面和的边，

所以：面*AD*的边也是中项面有理面和的边。

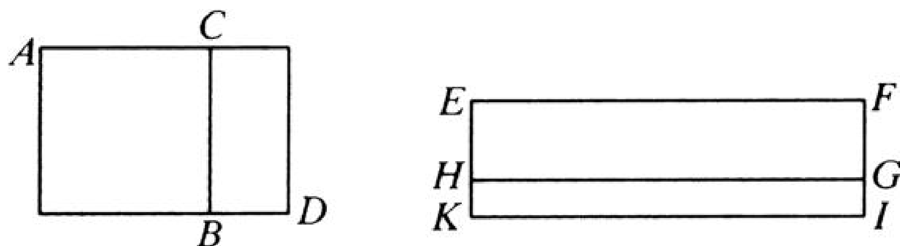
以上就是所要证明的。

证完。

命题72

…

假如把两个彼此不可公度的中项面相加，那么可产生两个无理线段，也就是要么是一个第二双中项线，要么是一个两中项面和的边。



设：*AB*与*CD*是两个彼此不可公度的中项面，令*AB*与*CD*相加。

那么可以说：*AD*的边要么是一个第二双中项线，要么是一个两中项面和的边。

因为：*AB*大于或者小于*CD*，

先设：*AB*大于*CD*，

已知：有理线段*EF*，并在*EF*上贴合一个矩形*EG*等于*AB*，产生出作为宽的*EH*，且矩形*HI*等于*CD*，产生出作为宽的*HK*，

因为：面*AB*、*CD*都是中项面，

因此：面*EG*、*HI*也都是中项面，

并且它们都是贴合于有理线段*FE*上的矩形，产生出作为宽的*EH*、*HK*，

所以：线段*EH*、*HK*的每一个是有理的，并与*EF*是长度不可公度的。[X. 22]

因为：AB与CD不可公度，并且AB等于EG，且CD等于HI，

所以：EG与HI也是不可公度的。

因为：EG比HI如同EH比HK，[VI. 1]

因此：EH与HK是长度不可公度的，[X. 11]

所以：EH、HK是仅正方可公度的两有理线段，

因此：EK是二项线。[X. 36]

因为：EH上的正方形比HK上的正方形大一个与EH要么是可公度的，要么是不可公度的线段上的正方形，

设：EH上的正方形比HK上的正方形大一个与EH是长度可公度的线段上的正方形，

因为：线段EH、HK的每一个与所给出的有理线段EF是长度不可公度的，

因此：EK是一个第三二项线。[X. 定义II. 3]

又因：EF是有理的，

且倘若由有理线段和第三二项线围成一个矩形面，那么此面的边是一个第二双中项线，[X. 56]

所以：与EI，也就是AD的边是一个第二双中项线。

又设：EH上的正方形比HK上的正方形大一个与EH是不可公度的线段上的正方形。

因为：线段EH、HK每一个与EF是长度不可公度的，

所以：EK是一个第六二项线。[X. 定义II. 6]

又因：倘若由有理线段和第六二项线围成一个矩形面，

那么该面的边是一个两中项面和的边，[X. 59]

所以：面AD的边也是一个两中项面和的边。

证完。

二项线和它以后的无理线段既不同于中项线，又彼此不相同。

因为如果在一条有理线段上贴合一个与中项线上的正方形相等的矩形，那么产生出的宽是有理的，并与原有理线段是长度不可公度的。[X. 22]

但是，假如在一条有理线段上贴合一个与二项线上的正方形相等的矩形，那么产生出的宽是第一二项线。[X. 60]

假如在有理线段上贴合一个与第一双中项线上的正方形相等的矩形，那么产生出作为宽的线段是第二二项线。[X. 61]

假如在有理线段上贴合一个与第二双中项线上的正方形相等的矩形，那么产生作为宽的线段是第三二项线。[X. 62]

假如在有理线段上贴合一个与主线上的正方形相等的矩形，那么产生出作为宽的线段是第四二项线。[X. 63]

假如在有理线段上贴合一个与中项面有理面和的边上的正方形相等的矩形，那么矩形另一边是第五二项线。[X. 64]

假如在有理线段上贴合一个与两中项面和的边上的正方形相等的矩形，那么产生出作为宽的线段是第六二项线。[X. 65]

同时上面所述的那些产生出作为宽的线段，既与第一条有理线段不同，并且又彼此不同。与第一条有理线段不同，是因为它是有理的；且又彼此不同，是因为它们不同级，因此所得的这些无理线段是彼此不同的。

命题73

…

假如从一有理线段减去一与此线仅正方可公度的有理线段，那么余线段为无理线段，称为余线。



设：从有理线段AB减去与AB仅正方可公度的有理线段BC。

那么可以说：余量AC是被称为余线的无理线段。

因为：AB与BC是长度不可公度的，

并且AB比BC如同AB上的正方形比矩形AB、BC，

所以：AB上的正方形与矩形AB、BC是不可公度的。[X. 11]

因为：AB、BC上的正方形的和与AB上的正方形是可公度的，[X. 15]

并且二倍的矩形AB、BC与矩形AB、BC是可公度的。[X. 6]

又因：AB、BC上的正方形的和等于二倍矩形AB、BC连同CA上的正方形的和，[II. 7]

所以：AB、BC上的正方形的和与余量AC上的正方形是不可公度的。[X. 13，16]

因为：AB、BC上的正方形的和是有理的，

因此：AC是无理的。[X. 定义4]

它被称为余线。

证完。

命题74

…

假如从一中项线减去与此线仅正方可公度的中项线，并且以这两中项线围成的矩形是有理面，那么所得余量是无理的，被称为第一中项余线。



从中项线*AB*减去与*AB*仅正方可公度的中项线*BC*，并且矩形*AB*、*BC*是有理的。

那么可以说：余量*AC*是无理的，并称其为第一中项余线。

因为：*AB*、*BC*是中项线，

所以：*AB*、*BC*上的正方形也都是中项面。

因为：二倍的矩形*AB*、*BC*是有理的，

所以：*AB*、*BC*上的正方形的和与二倍矩形*AB*、*BC*是不可公度的，

因此：二倍矩形*AB*、*BC*与余量*AC*上的正方形也是不可公度的。[参看II. 7]

因为：倘若整个的和与二量之一不可公度，那么原来二量是不可公度的，[X. 16]

并且二倍矩形*AB*、*BC*是有理的，

所以：*AC*上的正方形是无理的，

因此：*AC*是无理的，[X. 定义4]

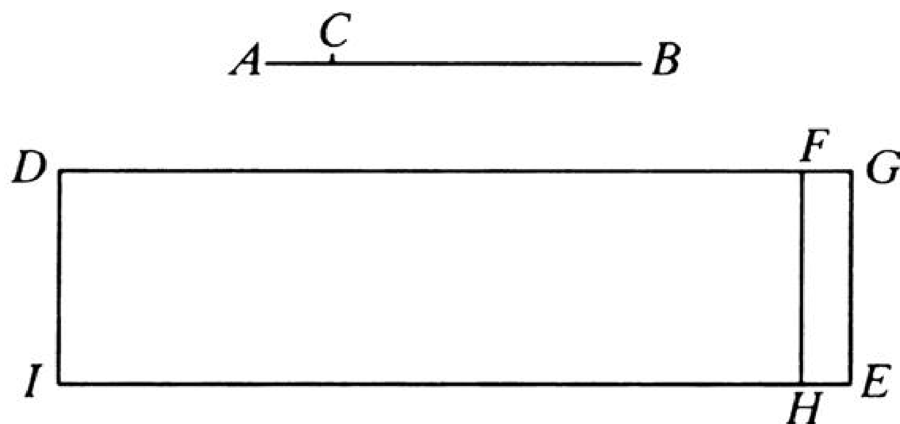
它被称为第一中项余线。

证完。

命题75

…

假如从一个中项线减去一个与此中项线仅正方可公度又与原中项线围成的矩形为中项面的中项线，那么所得余量是无理的，称为第二中项余线。



从中项线*AB*减去一个与*AB*仅正方可公度的中项线*CB*，且矩形*AB*、*BC*是中项面，[X. 28]

那么可以说：余量*AC*是无理的，并称其为第二中项余线，

那么：给定一条有理线段*DI*，并在*DI*上贴合一矩形*DE*等于*AB*、*BC*上的正方形的和，产生出作为宽的*DG*。

又在*DI*上贴合*DH*等于二倍的矩形*AB*、*BC*，产生作为宽的*DF*，

所以：余量*FE*等于*AC*上的正方形，[II. 7]

因为：*AB*、*BC*上的正方形都是中项面并且是可公度的，

所以：DE也是中项面。[X. 15和23，推论]

因为：它是贴合于有理线段DI上的矩形，产生出作为宽的DG，

因此：DG是有理的，并且与DI是长度不可公度的。[X. 22]

因为：矩形AB、BC是中项面，

所以：二倍的矩形AB、BC也是中项面。[X. 23，推论]

又因：它等于DH，

所以：DH也是中项面。

因为：它是贴合于有理线段DI上，产生出作为宽的DF，

因此：DF是有理的，并且与DI是长度不可公度的。[X. 22]

因为：AB、BC是仅正方可公度的，

所以：AB与BC是长度不可公度的，

因此：AB上的正方形与矩形AB、BC也是不可公度的。[X. 11]

因为：AB、BC上的正方形的和与AB上的正方形是可公度的，[X. 15]

并且二倍的矩形AB、BC与矩形AB、BC是可公度的，[X. 6]

因此：二倍的矩形AB、BC与AB、BC上的正方形的和是不可公度的。[X. 13]

因为：DE等于AB、BC上的正方形的和，

并且DH等于二倍矩形AB、BC，

所以：DE与DH是不可公度的。

因为：DE比DH如同GD比DF，[VI. 1]

所以：*GD*与*DF*是不可公度的。[X. 11]

因为：*GD*、*DF*都是有理的，

所以：*GD*、*DF*是仅正方可公度的两有理线段，

因此：*FG*是一条余线。[X. 73]

因为：*DI*是有理的，

且由有理线段和无理线段围成的矩形是无理的，[从X. 20推出]

它的边是无限的。

又因：*AC*是*FE*的边

所以：*AC*是无理的。

*AC*被称为第二中项余线。

证完。

命题76

…

假如从一条线段上减去一个与它是正方不可公度的线段，并且它们上的正方形的和是有理的，但是以它们围成的矩形是中项面，那么所得余量是无理的，称为次线。



从线段*AB*减去与*AB*是正方不可公度的线段*BC*，且满足假定条件。[X. 33]

那么可以说：余量*AC*是称作次线的无理线段。

因为：AB、BC上的正方形的和是有理的，且二倍矩形AB、BC是中项面，

所以：AB、BC上的正方形的和与二倍矩形AB、BC是不可公度的。

又因，变更后：AB、BC上的正方形的和与余量，

也就是AC上的正方形是不可公度的，[II. 7，X. 16]

因为：AB、BC上的正方形都是有理的，

所以：AC上的正方形是无理的，

因此：余量AC是无理的，

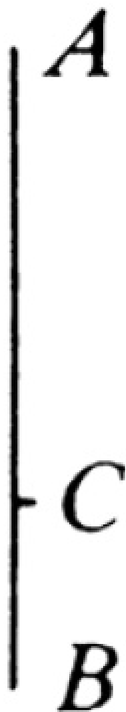
它被称为次线。

证完。

命题77

…

假如从一条线段上减去一个与此线段正方不可公度的线段，且该线段与原线段上的正方形的和是中项面，但以它们围成的矩形的二倍是有理的，那么余量是无理的，称其为中项面有理面差的边。



从线段AB上减去一个与AB是正方不可公度的线段BC，并满足所给的条件。[X. 34]

那么可以说：AC是上述的无理线段。

因为：AB、BC上的正方形的和是中项面，且二倍矩形AB、BC是有理的，

因此：AB、BC上的正方形的和与二倍的矩形AB、BC是不可公度的，

所以：余量，也就是AC上的正方形，与二倍的矩形AB、AC也是不可公度的。[II. 7，X. 16]

又因：二倍的矩形AB、BC是有理的，

所以：AC上的正方形是无理的，

因此：AC是无理的，

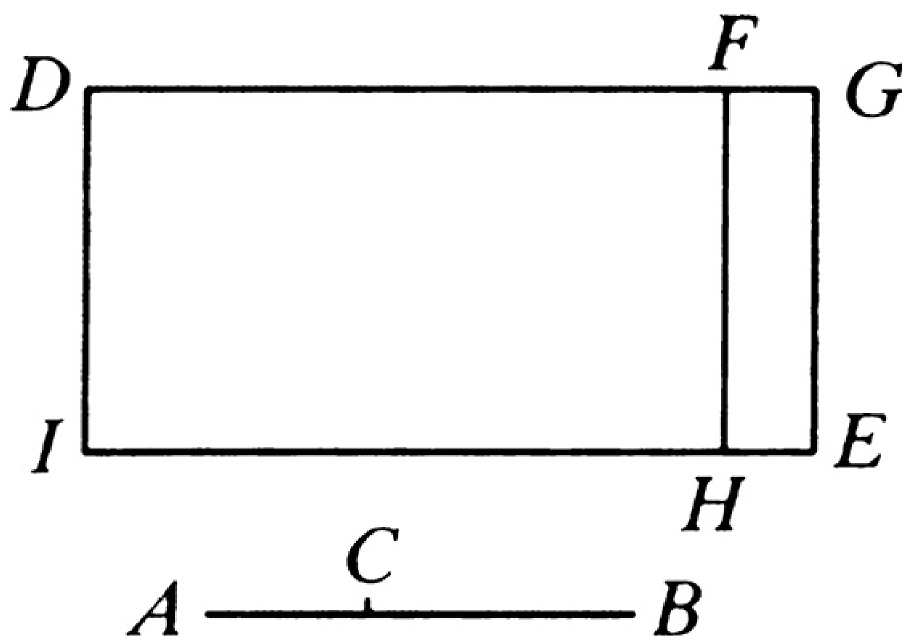
故把AC称为中项面有理面差的边。

证完。

命题78

…

假如从一条线段减去与此线段是正方不可公度的线段，并且该线段与原线段上的正方形的和是中项面，又由它们围成的矩形的二倍也是中项面，且它们上的正方形的和与由它们围成的矩形的二倍是不可公度的，那么余量是无理的，称为两中项面差的边。



从线段AB减去与AB是正方不可公度的线段BC，并满足所给的条件。[X. 35]

那么可以说：余量AC称为两中项面差的边的无理线段。

已知一条有理线段DI，并在DI上贴合一DE等于AB、BC上的正方形的和，产生出作为宽的DG，

且矩形DH等于二倍矩形AB、BC，

因此：余量FE等于AC上的正方形，[II. 7]

所以：AC是等于EF的正方形的边。

因为：AB、AC上的正方形的和是中项面且等于DE，

所以：DE是中项面。

因为：它是贴合于有理线段DI上，产生出作为宽的DG，

因此：DG是有理的，并与DI是长度不可公度的。[X. 22]

因为：二倍的矩形AB、BC是中项面且等于DH，

所以：DH是中项面。

又因：它是贴合于有理线段DI上的，产生出作为宽的DF，

因此：DF也是有理的，且与DI是长度不可公度的。[X. 22]

因为：AB、BC上的正方形的和与二倍矩形AB、BC是不可公度的，

因此：DE与DH也是不可公度的。

因为：DE比DH也如同DG比DF，[VI. 1]

所以：DG与DF是不可公度的。[X. 11]

因为：两者都是有理的，

所以：GD、DF是仅正方可公度的两有理线段，

因此：FG是一条余线。[X. 73]

因为：FH是有理的，

但是由一条有理线段和一条余线围成的矩形是无理的，[从X.　20，推出]，

并且它的边是无理的，

又因：AC是FE的边，

所以：AC是无理线段，

故AC被称为两中项面差的边。

证完。

命题79

…

仅有一条有理线段可以附加到一条余线上，能使此有理线段与全线段是仅正方可公度的。



设：AB是一条余线，而BC是加到AB上的附加线段；

因此：AC、CB是仅正方可公度的两有理线段。[X. 73]

那么可以说：没有别的有理线段可以附加到AB上，使得此有理线段与全线段仅正方可公度。

设：BD是附加线段，

因此：AD、DB是仅正方可公度的两有理线段。[X. 73]

因为：AD、DB上的正方形的和比二倍矩形AD、DB所超过的量，

也是AC、CB上的正方形之和比二倍矩形AC、CB所超过的量，

因为：二者都超出AB上的正方形，

因此，变更后：AD、DB上的正方形的和比AC、CB上的正方形的和

所超过的量是二倍的矩形*AD*、*DB*比二倍的矩形*AC*、*CB*所超过的量。

又因：*AD*、*DB*上的正方形的和比*AC*、*CB*上的正方形的和超出一个有理面，这是因为两者都是有理面，

所以：二倍矩形*AD*、*DB*比二倍矩形*AC*、*CB*所超过的量也为一个有理面。

这是不符合实际的。

因为：两者都是中项面，[X. 21]

且一个中项面与一个中项面之差不是有理面，[X. 26]

因此：没有另外有理线段附加到*AB*上，使得此有理线段与全线段是仅正方可公度的，

因此：仅有一条有理线段附加到一条余线上，能使得此有理线段与全线段是仅正方可公度的。

证完。

命题80

…

仅有一个中项线可以附加到一个中项线的第一余线上，能使此中项线与全线段是仅正方可公度的，并且它们围成的矩形是有理的。



设：*AB*是一个中项线的第一余线，*BC*是加到*AB*上的附加线段，

因此：*AC*、*CB*是仅正方可公度的两中项线，并且矩形*AC*、*CB*是有理面。[X. 74]

那么可以说：没有另外的中项线加到AB上，能使得中项线与全线段是仅正方可公度的，并且它们围成的矩形是有理面。

设：DB也是这样附加上的线段，

那么：AD、DB也是仅正方可公度的中项线，矩形AD、DB是有理面。[X. 74]

因为：AD、DB上的正方形的和比二倍的矩形AD、DB所超过的量也是AC、CB上的正方形的和比二倍的矩形AC、CB所超过的量，

因为：它们超过同一个量，也就是AB上的正方形，[II. 7]

因此，变更后：AD、DB上的正方形的和比AC、CB上的正方形的和所超过的量也是二倍的矩形AD、DB比二倍的矩形AC、CB所超过的量。

因为：二倍矩形AD、DB比二倍矩形AC、CB超出一个有理面，

又因：两者都是有理面，

因此：AD、DB上的正方形的和比AC、CB上的正方形的和也超过一个有理面。

这是不符合实际的。

因为：两者都是中项面，[X. 15和23，推论]

并且一个中项面不会一个中项面大一个有理面，[X. 26]

因此证明了命题。

证完。

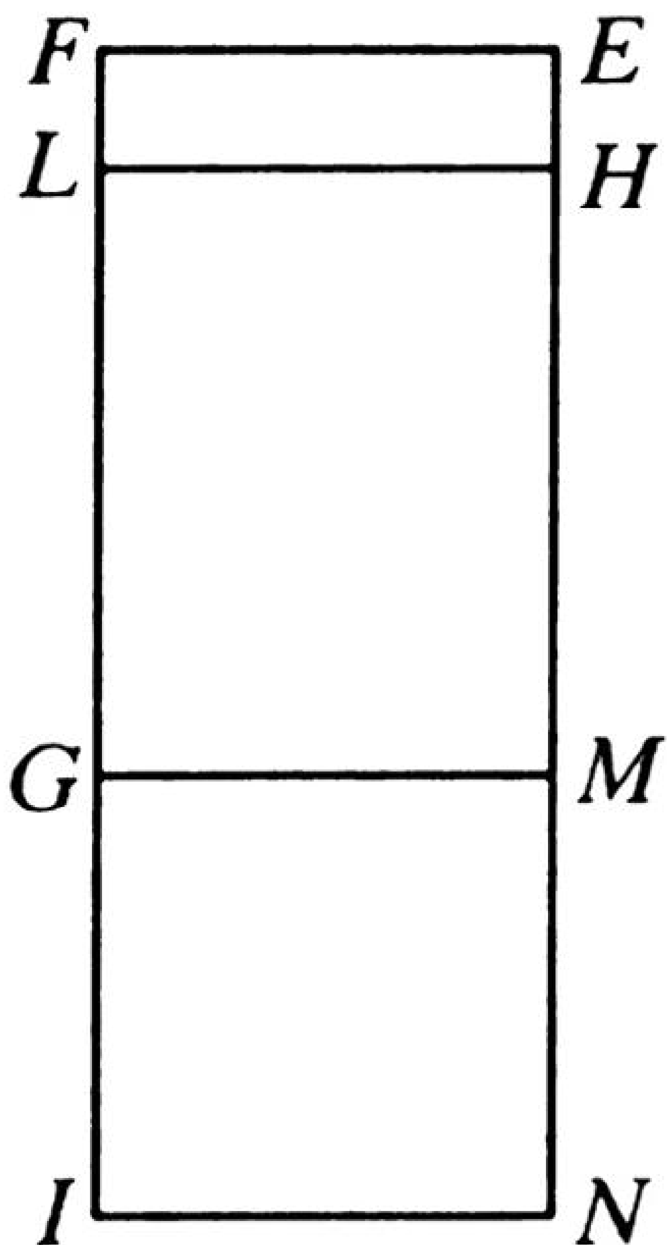
命题81

…

仅有一个中项线附加到一个中项线第二余线上，能使此中项线和全线段

是仅正方可公度，并且它们围成的矩形是一个中项面。





设：AB是一个中项线的第二余线，BC是加到AB上的附加线段，

因此：AC、CB是仅正方可公度的两中项线，矩形AC、CB是一个中项面。[X. 75]

那么可以说：没有另外的中项线附加到AB上，使得此中项线与全线段是仅正方可公度的，并且由它们围成的矩形是一个中项面。

设：BD也是这样附加上去的线段，

那么：AD、DB也是仅正方可公度的两中项线，

因此：矩形AD、DB是中项面。[X. 75]

又已知EF是有理线段，并在EF上贴合一个等于AC、CB上的正方形的和的矩形EG，产生出作为宽的EM，

并从中减去HG等于二倍矩形AC、CB，产生出作为宽的HM，

因此：余量EL等于AB上的正方形。[II. 7]

因为：AB是EL的边。

又设：在EF上贴合一个EI等于AD、DB上的正方形的和，产生出作为宽的EN，

又因：EL等于AB上的正方形，

所以：余量HI等于二倍矩形AD、DB。[II. 7]

因为：AC、CB都是中项线，

因此：AC、CB上的正方形也都是中项面，

它们的和等于EG，

所以：EG也是中项面。[X. 15和23，推论]

因为：它是贴合于有理线段EF上，产生出作为宽的EM，

所以：EM是有理的，并且与EF是长度不可公度的。[X. 22]

因为：矩形AC、CB是中项面，

二倍的矩形AC、CB也是中项面，[X. 23，推论]

且它等于HG，

所以：HG也是中项面。

因为：它是贴合于有理线段EF上，产生出作为宽的HM，

所以：HM也是理的，与EF是长度不可公度的。[X. 22]

因为：AC、CB是仅正方可公度的，

因此：AC与CB是长度不可公度的。

因为：AC比CB如同AC上的正方形比矩形AC、CB，

所以：AC上的正方形与矩形AC、CB是不可公度的。[X. 11]

因为：AC、CB上的正方形的和与AC上的正方形是可公度的，

二倍的矩形AC、CB与矩形AC、CB是可公度的，[X. 6]

因此：AC、CB上的正方形的和与二倍矩形AC、CB是不可公度的。[X. 13]

因为：EG等于AC、CB上的正方形的和，GH等于二倍矩形AC、CB，

所以：EG与HG是不可公度的。

又因：EG比HG如同EM比HM，[VI. 1]

所以：EM与MH是长度不可公度的，[X. 11]

并且两者都是有理的，

因此：*EM*、*MH*是仅正方可公度的两有理线段，

因此：*EH*是一条余线，并且*HM*是附加在其上的线段。[X. 73]

同理可证：*HN*也是附加在*EH*上的线段。

所以：有不同的线段附加在一条余线上，并且它们的与所得的全线段是仅正方可公度的。

这是不符合实际的。

证完。

命题82

…

仅有一条线段附加到一个次线上，能使此线与全线段是正方不可公度的，并且它们上的正方形的和是有理的，而以它们围成的矩形的二倍是中项面。



设：*AB*是一条次线，*BC*则附加到*AB*上，

因此：*AC*、*CB*是正方不可公度的，它们上的正方形的和是有理的，并且以它们围成的矩形的二倍是中项面。[X. 76]

那么可以说：没有另外的线段附加到*AB*上，能满足同样的条件。

设：*BD*是这样附加的线段，

因此：*AD*、*DB*也是满足上述条件的正方不可公度的两线段。[X. 76]

因为：*AD*、*DB*上的正方形的和比*AC*、*CB*上的正方形的和所超过的

量也是二倍矩形*AD*、*DB*比二倍矩形*AC*、*CB*所超过的量，

并且*AD*、*DB*上的正方形的和比*AC*、*CB*上的正方形之和超过的量为一个有理面，

又因：两者都是有理面，

因此：二倍矩形*AD*、*DB*也超过二倍矩形*AC*、*CB*的量为一个有理面。

因为：两者都是中项面，[X. 26]

所以：这是不符合实际的，

因此：仅有一条线段附加到一条次线上，能使此线段与全线段是正方不可公度的，并且它们上的正方形的和是有理的，而以它们围成的矩形的二倍是中项面。

证完。

命题83

…

仅有一条线段附加到一个中项面有理面差的边上，能使该线段与全线段是正方不可公度的，并且在它们上的正方形的和是中项面，那么以它们围成的矩形的二倍是有理面。



设：*AB*是一个中项面有理面差的边，*BC*是附加到*AB*上的线段，

因此：*AC*、*CB*是正方不可公度的两线段，并且满足前述条件。[X. 77]

那么可以说：没有另外的线段能附加到*AB*上，并且满足同样的条

件。

设：如果BD是这样附加上的线段，

那么：AD、DB是正方不可公度的，且满足已知条件。[X. 77]

因此：如前所述，AD、DB上的正方形的和比AC、CB上的正方形的和所超过的量也是二倍矩形AD、DB比二倍矩形AC、CB所超过的量。

又因：二倍矩形AD、DB比二倍矩形AC、CB是有理的，

且二者都是有理的，

因此：AD、DB上的正方形的和比AC、CB上的正方形的和的超过的量也是一个有理面。

又因：二者都是中项面，[X. 26]

所以：这是不符合实际的，

因此：没有别的线段附加到AB上，且该线段与全线段是正方不可公度的，且它与整条线段满足前述的条件，

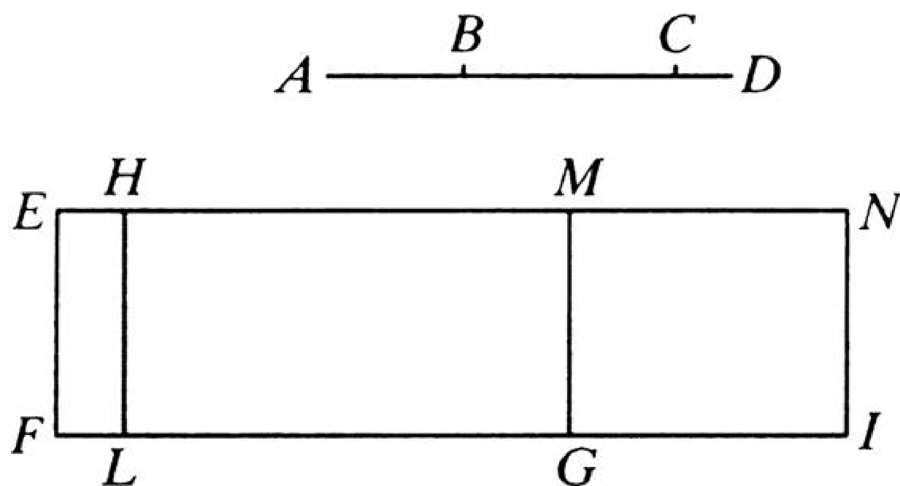
所以：仅有一条线段能这样附加上去。

证完。

命题84

…

仅有一条线段能附加到一条两个中项面差的边上，能使该线段与全线段是正方不可公度的，并且它们上的正方形的和是中项面，以它们围成的矩形的二倍既是中项面，又与它们上的正方形的和不可公度。



设：AB是一个两中项面差的边，BC是附加到AB上的线段，

因此：AC、CB是正方不可公度的两线段，且满足前述的条件。[X. 78]

那么可以说：没有另外的线段附加到AB上，且满足上述条件。

设：BD是这样附加上的线段，

因此：AD、DB也是正方不可公度的，

并且AD、DB上的正方形的和是中项面，二倍的矩形AD、DB是中项面，又AD、DB上的正方形的和与二倍的矩形AD、DB也是不可公度的。[X. 78]

已知一条有理线段EF，并在EF上贴合EG等于AC、CB上的正方形的和，产生出作为宽的EM，

在EM上贴合于HG等于二倍的矩形AC、CB，产生出作为宽的HM，

所以：余量，也就是AB上的正方形[II. 7]，等于FL，

因此：AB是与LE相等的正方形的边，

因为：在EF上贴合于EI等于AD、DB上的正方形的和，产生出作为宽的EN，

因为：*AB*上的正方形等于*EL*，

因此：余量，也就是二倍的矩形*AD*、*DB*[II. 7]，等于*HI*。

因为：*AC*、*CB*上的正方形的和是中项面，等于*EG*，

所以：*EG*也是中项面。

因为：它是贴合于有理线段*EF*上的，产生出作为宽的*EM*，

所以：*EM*是有理的，且与*EF*是长度不可公度的。[X. 22]

因为：二倍的矩形*AC*、*CB*是中项面，且等于*HG*，

因此：*HG*也是中项面。

因为：它是贴合于有理线段*EF*上，产生作为宽的*HM*，

所以：*HM*是有理的，且与*EF*是长度不可公度的。[X. 22]

因为：*AC*、*CB*上的正方形的和与二倍的矩形*AC*、*CB*是不可公度的，且*EG*与*HG*也是不可公度的，

所以：*EM*与*MH*也是长度不可公度的。[VI. 1，X. 11]

因为：二者都是有理的，

所以：*EM*、*MH*是仅正方可公度的有理线段，

因此：*EH*是一条余线，*HM*是附加到它上的线段。[X. 73]

同理可证：*EH*也是一条余线，*HN*是附加到它上的，

所以：有不同的有理线附加到一条余线上，与全线段是仅正方可公度的，

这是不切实际的。[X. 79]

所以：没有线段能附加到*AB*上。

因此：仅有一条线段能附加到AB上，该线段与全线段是正方不可公度的，并且它们上的正方形的和是中项面，以它们围成的矩形的二倍是中项面，它们上的正方形的和与由它们围成的矩形的二倍是不可公度的。

证完。

定义III

01 给定一条有理线段和一条余线，如果全线段上的正方形比附加上去的线段上的正方形大一个与全线段是长度可公度的一条线段上的正方形，且全线段与给定的有理线段是长度可公度的，那么把此余线称为第一余线。

02 但若附加线段与给定的有理线段是长度可公度的，而全线段上的正方形比附加线段上的正方形大一个与全线段可公度的一条线段上的正方形，那么把此余线称为第二余线。

03 但若全线段及附加线段两者与给定的有理线段都是长度不可公度的，且全线段上的正方形比附加线段上的正方形大一个与全线段可公度的一条线段上的正方形，那么把此余线称为第三余线。

04 又若全线段上的正方形比附加线段上的正方形大一个与全线段不可公度的一条线段上的正方形，此外，如果全线段与给定的有理线段是长度可公度的，那么把此余线称为第四余线。

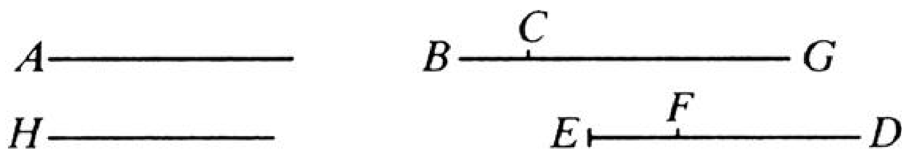
05 若附加线段与已知有理线段是长度可公度的，那么把此余线称为第五余线。

06 若全线段及附加线段两者与给定有理线段都是长度不可公度的，那么把此余线称为第六余线。

命题85

…

求第一余线。



设：已知有理线段A，而BG与A是与长度可公度的，

因此：BG也是有理线段。

已知DE、EF是两个平方数，而它们的差FD不是平方数，

那么：ED与DF的比不同于一个平方数比一个平方数。

设已作出比例：ED比DF如同BG上的正方形比GC上的正方形，[X. 6，推论]

因此：BG上的正方形与GC上的正方形是可公度的。[X. 6]

因为：BG上的正方形是有理的，

因此：GC上的正方形也是有理的，

所以：GC也是有理的。

因为：ED比DF不同于一个平方数比一个平方数，

因此：BG上的正方形与GC上的正方形的比也不同于一个平方数比一个平方数，

所以：BG与GC是长度不可公度的。[X. 9]

又因：两者都是有理的，

所以：BG、GC是仅正方可公度的两有理线段，

因此：BC是一条余线。[X. 73]

接下来可以证明：它也是一个第一余线。

那么，设：H上的正方形是BG上的正方形与GC上的正方形的差。

因为：ED比FD如同BG上的正方形比GC上的正方形，

因此，由换比：DE与EF如同GB上的正方形比H上的正方形。

因为：DE与EF的比如同一个平方数比一个平方数，

且每一个都是平方数，

因此：GB上的正方形与H上的正方形之比如同一个平方数比一个平方数，

所以：BG与H是长度可公度的。[X. 9]

因为：BG上的正方形比GC上的正方形大一个与BG是长度可公度的线段上的正方形，

且全线段BG与给定的有理线段A是长度可公度的，

所以：BC是第一余线，[X. 定义III. 1]

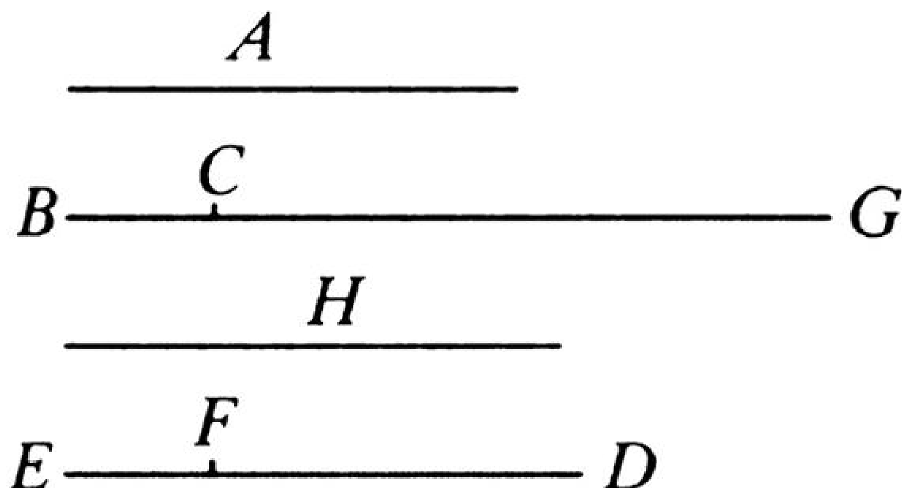
因此：第一余线已求出。

证完。

命题86

…

求第二余线。



设：已知一条有理线段A，且GC与A是长度可公度的。

因此：GC是有理的。

已知DE、EF是两个平方数，而它们的差DF不是平方数。

设已作出比例：FD比DE如同CG上的正方形比GB上的正方形。[X. 6，推论]

因此：CG上的正方形与GB上的正方形是可公度的。[X. 6]

因为：CG上的正方形是有理的，

所以：GB上的正方形也是有理的，

因此：BG也是有理线段。

因为：GC上的正方形与GB上的正方形的比不同于一个平方数比一个平方数，

因此：CG与GB是长度不可公度的。[X. 9]

又因：两者都是有理的，

所以：CG、GB是仅正方可公度的两有理线段，

所以：BC是一条余线。[X. 73]

接下来可以证明：它是一个第二余线。

设：H上的正方形是BG上的正方形比GC上的正方形所超过的量。

因为：BG上的正方形比GC上的正方形如同数ED比数DF，

因此，由换比：BG上的正方形比H上的正方形如同DE比EF。[V. 19，推论]

又因：两数DE、EF都是平方数，

所以：BG上的正方形与H上的正方形的比如同一个平方数比一个平方数，

所以：BG与H是长度可公度的。[X. 9]

因为：BG上的正方形比GC上的正方形大一个H上的正方形，

所以：BG上的正方形比GC上的正方形大一个与BG是长度可公度的线段上的正方形。

又因：附加线段CG与给定的有理线段A是可公度的，

所以：BC是一个第二余线，[X. 定义III. 2]

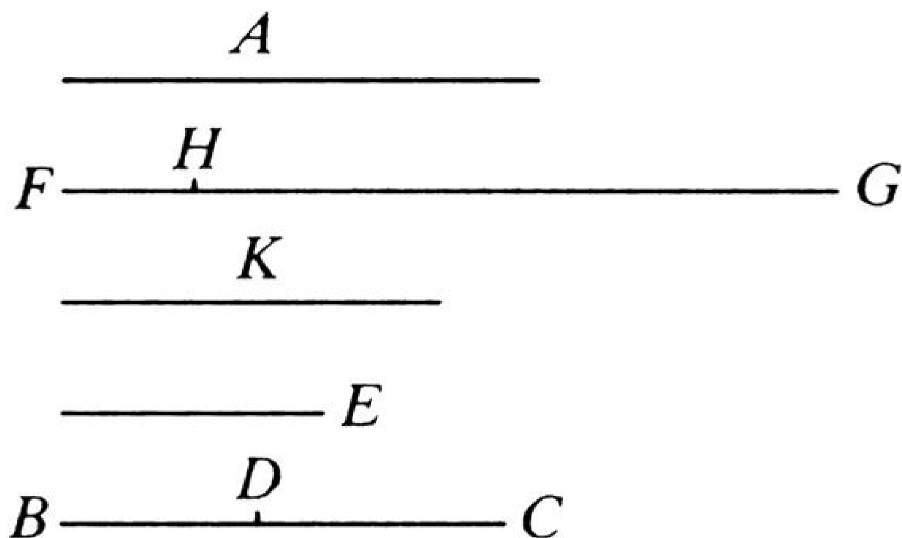
因此：第二余线BC已求出。

证完。

命题87

…

求第三余线。



设：A是有理线段，数E、BC、CD任两者的比不同于一个平方数比一个平方数。

但CB与BD的比如同一个平方数比一个平方数。

设作出比例：E比BC如同A上的正方形比FG上的正方形。

令BC比CD如同FG上的正方形比GH上的正方形。[X. 6，推论]

因为：E比BC如同A上的正方形比FG上的正方形，

因此：A上的正方形与FG上的正方形是可公度的。[X. 6]

因为：A上的正方形是有理的，

所以：FG上的正方形也是有理的，

因此：FG是有理的。

因为：E与BC的比不同于一个平方数比一个平方数，

所以：A上的正方形与FG上的正方形的比也不同于一个平方数比一个平方数，

因此：A与FG是长度不可公度的。[X. 9]

因为：BC比CD如同FG上的正方形比GH上的正方形，

因此：FG上的正方形与GH上的正方形是可公度的。[X. 6]

因为：FG上的正方形是有理的，

所以：GH上的正方形也是有理的，

因此：GH是有理的。

因为：BC与CD的比不同于一个平方数比一个平方数，

因此：FG上的正方形比GH上的正方形也不同于一个平方数比一个平方数，

所以：FG与GH是长度不可公度的。[X. 9]

又因：两者都是有理的，

所以：FG、GH是仅正方可公度的两有理线段，

因此：FH是一条余线。[X. 73]

接下来可以证明：它也是一个第三余线。

因为：E比BC如同A上的正方形比FG上的正方形，

且BC比CD如同FG上的正方形比HG上的正方形，

因此，取首末比：E比CD如同A上的正方形比HG上的正方形。[V. 22]

因为：E与CD的比不同于一个平方数比一个平方数，

所以：A上的正方形与GH上的正方形的比不同于一个平方数比一个平方数，

所以：A与GH是长度不可公度的，[X. 9]

因此：线段FG、GH都与给定的有理线段A不是长度可公度的。

设：*K*上的正方形是*FG*上的正方形比*GH*上的正方形所超过的量。

因为：*BC*比*CD*如同*FG*上的正方形比*GH*上的正方形，

因此，由换比：*BC*比*BD*如同*FG*上的正方形比*K*上的正方形。[V. 19，推论]

因为：*BC*与*BD*的比如同一个平方数比一个平方数，

因此：*FG*上的正方形与*K*上的正方形的比也如同一个平方数比一个平方数，

所以：*FG*与*K*是长度可公度的，[X. 9]

并且*FG*上的正方形比*GH*上的正方形大一个与*FG*是可公度的线段上的正方形。

又因：*FG*、*GH*都与所给定的有理线段*A*不是长度可公度的，

所以：*FH*是一个第三余线，[X. 定义III. 3]

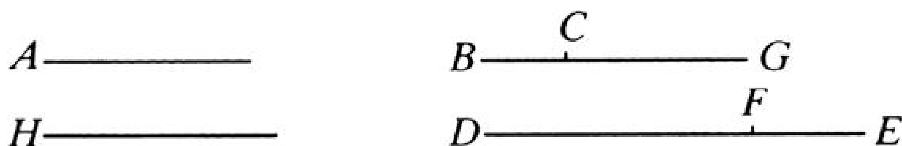
因此：第三余线*FH*已作出。

证完。

命题88

…

求第四余线。



已知*A*是一条有理线段，并与*BG*是长度可公度的；

因此：*BG*也是有理线段。

设：已知两个数DF、FE，使它们的和DE与数DF、EF每一个的比不同于一个平方数比一个平方数。

设作出比例：DE比EF如同BG上的正方形比GC上的正方形，[X. 6，推论]

因此：BG上的正方形与GC上的正方形是可公度的。[X. 6]

因为：BG上的正方形是有理的，

所以：GC上的正方形也是有理的，

因此：GC是有理的。

因为：DE与EF的比不同于一个平方数比一个平方数，

所以：BG上的正方形与GC上的正方形的比也不同于一个平方数比一个平方数，

因此：BG与GC是长度不可公度的。[X. 9]

又因：两者都是有理的，

所以：BG、GC是仅正方可公度的两有理线段，

所以：BC是一条余线。[X. 73]

设：H上的正方形是BG上的正方形比GC上的正方形所超过的量，

因为：DE比EF如同BG上的正方形比GC上的正方形，

因此，由换比：ED比DF如同GB上的正方形比H上的正方形。[V. 19，推论]

因为：ED与DF的比不同于一个平方数比一个平方数，

所以：GB上的正方形与H上的正方形的比不同于一个平方数比一个平方数，

因此：BG与H是长度不可公度的。[X. 9]

因为：BG上的正方形比GC上的正方形大一个H上的正方形，

因此：BG上的正方形比GC上的正方形大一个与BG是不可公度的线段上的正方形。

因为：整体BG与所给定的有理线段A是长度可公度的，

所以：BC是一个第四余线，[X. 定义III. 4]

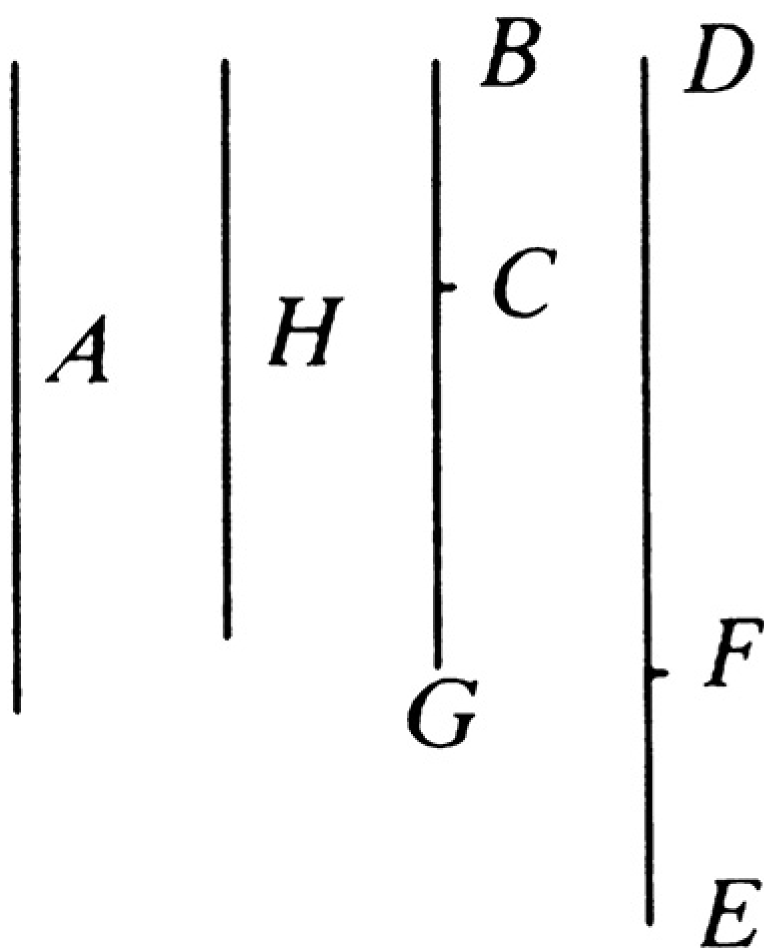
因此：第四余线BC已求出。

证完。

命题89

…

求第五余线。



已知*A*是一条有理线段，且*A*与*CG*是长度可公度的，

因此：*GC*是有理的。

已知两数*DF*、*FE*，并且令*DE*与线段*DF*、*FE*的每一个的比不同于一个平方数比一个平方数，

设作出比例：*FE*比*ED*如同*CG*上的正方形比*GB*上的正方形，

因此：*GB*上的正方形也是有理的，[X. 6]

所以：*BG*也是有理的。

因为：*DE*比*EF*如同*BG*上的正方形比*GC*上的正方形，

且DE与EF的比不同于一个平方数比一个平方数，

所以：BG上的正方形与GC上的正方形的比不同于一个平方数比一个平方数，

因此：BG与GC是长度不可公度的。[X. 9]

因为：两者都是有理的，

因此：BG、GC是仅正方可公度的两有理线段，

所以：BC是一条余线。[X. 73]

接下来可以证明：它是一个第五余线。

因为：设H上的正方形是BG上的正方形比GC上的正方形所超过的，

并且BG上的正方形比GC上的正方形如同DE比EF，

因此，由换比：ED比DF如同BG上的正方形比H上的正方形。[V. 19，推论]

因为：ED与DF的比不同于一个平方数比一个平方数，

所以：BG上的正方形与H上的正方形的比不同于一个平方数比一个平方数，

因此：BG与H是长度不可公度的。[X. 9]

因为：BG上的正方形比GC上的正方形大一个H上的正方形，

因此：GB上的正方形比GC上的正方形大一个与GB是长度不可公度的线段上的正方形。

因为：附加线段CG与所给定的有理线段A是长度可公度的，

所以：BC是一个第五余线，[X. 定义III. 5]

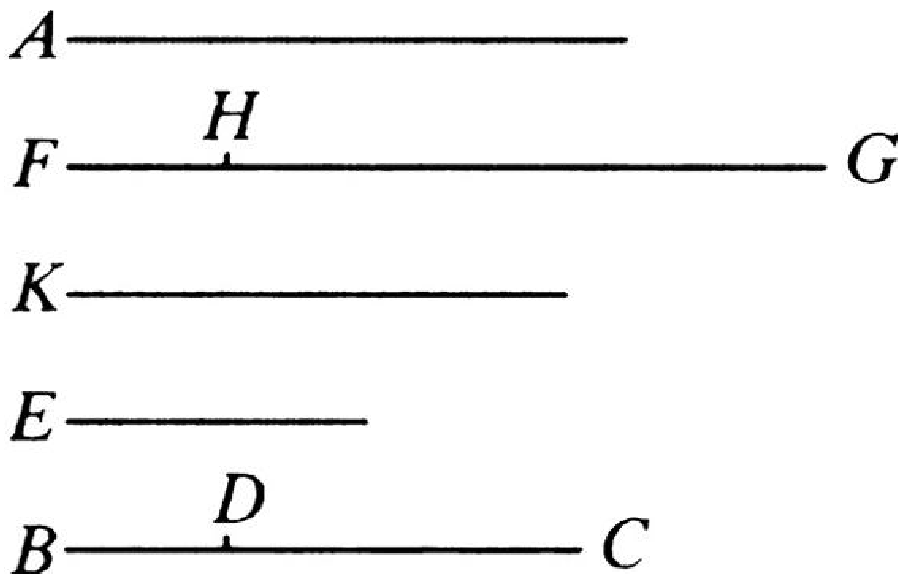
因此：第五余线BC已作出。

证完。

命题90

…

求第六余线。



已知一条有理线段*A*，且三个数*E*、*BC*、*CD*两两之比不同于一个平方数比一个平方数。

并且*CB*与*BD*的比也不同于一个平方数比一个平方数。

设作出比例：*E*比*BC*如同*A*上的正方形比*FG*上的正方形，

且*BC*比*CD*如同*FG*上的正方形比*GH*上的正方形。[X. 6，推论]

因为：*E*比*BC*如同*A*上的正方形比*FG*上的正方形，

因此：*A*上的正方形与*FG*上的正方形是可公度的。[X. 6]

又因：*A*上的正方形是有理的，

所以：FG上的正方形也是有理的，

因此：FG也是有理的。

因为：E与BC的比不同于一个平方数比一个平方数，

因此：A上的正方形与FG上的正方形的比不同于一个平方数比一个平方数，

所以：A与FG是长度不可公度的。[X. 9]

因为：BC比CD如同FG上的正方形比GH上的正方形，

因此：FG上的正方形与GH上的正方形是可公度的。[X. 6]

因为：FG上的正方形是有理的，

因此：GH上的正方形也是有理的，

所以：GH也是有理的。

因为：BC与CD的比不同于一个平方数比一个平方数，

所以：FG上的正方形与GH上的正方形的比不同于一个平方数比一个平方数，

因此：FG与GH是长度不可公度的。[X. 6]

又因：两者都是有理的，

所以：FG、GH是仅正方可公度的有理线段，

因此：FH是一条余线。[X. 73]

接下来可以证明：它也是一个第六余线。

因为：E比BC如同A上的正方形比FG上的正方形，

且BC比CD如同FG上的正方形比GH上的正方形，

因此，取首末比：E比CD如同A上的正方形比GH上的正方形。[V. 22]

因为：E与CD的比不同于一个平方数比一个平方数，

所以：A上的正方形与GH上的正方形的比也不同于一个平方数比一个平方数，

因此：A与GH是长度不可公度的，[X. 9]

所以：线段FG、GH的每一个与有理线段A不是长度可公度的。

设：K上的正方形是FG上的正方形比GH上的正方形所超过的，

因为：BC比CD如同FG上的正方形比GH上的正方形，

因此，由换比：CB比BD如同FG上的正方形比K上的正方形。[V. 19，推论]

因为：CB与BD的比不同于一个平方数比一个平方数，

所以：FG上的正方形与K上的正方形的比不同于一个平方数比一个平方数，

所以：FG与K是长度不可公度的。[X. 9]

又因：FG上的正方形比GH上的正方形大一个K上的正方形，

因此：FG上的正方形比GH上的正方形大一个与FG是长度不可公度的线段上的正方形。

因为：线段FG、GH的每一个与所给出的有理线段A不是可公度的，

所以：FH是一个第六余线，[X. 定义III. 6]

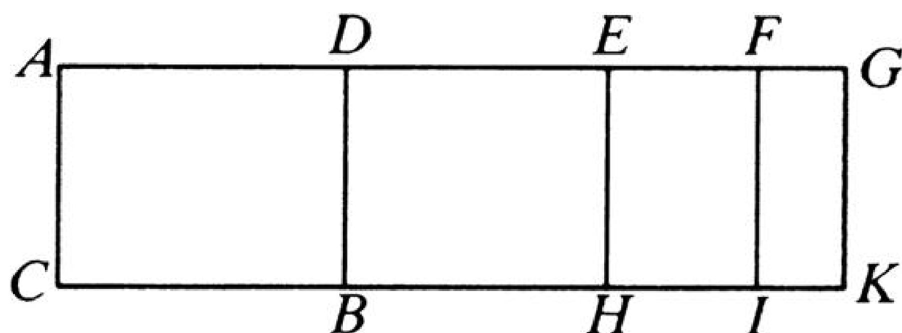
因此：第六余线FH已作出。

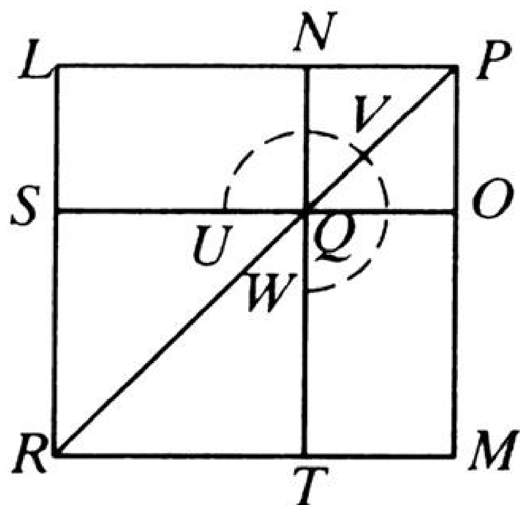
证完。

命题91

…

倘若一个面是由一条有理线段与一个第一余线围成的矩形，那么这个面的边是一条余线。





设：面AB是由有理线段AC与第一余线AD围成的矩形。

那么可以说：AB面的边是一条余线。

因为：AD是第一余线，

那么，设：DG是AD的附加线段，

因此：AG、GD是仅正方可公度的两有理线段。[X. 73]

因为：全线段AG与所给出的有理线段AC是可公度的，并且AG上的正方形比GD上的正方形大一个与AG是长度可公度的线段上的正方形。[X. 定义III. 1]

所以：倘若在AG上贴合一个等于DG上的正方形的四分之一且缺少一正方形的矩形，那么它被分为可公度的两段。[X. 17]

设：DG被E平分，在AG上贴合一个等于EG上的正方形且缺少一个正方形的矩形AF、FG，

因此：AF与FG是可公度的。

又过点E、F、G引EH、HI、GK平行于AC。

因为：AF与FG是长度可公度的，

所以：AG与线段AF、FG的每一个也是长度可公度的。[X. 15]

因为：AG与AC是可公度的，

因此：每一条线段AF、FG与AC是长度可公度的。[X. 12]

又因：AC是有理的，

因此：AF、FG也是有理的，

所以：每一条线段AI、FK也是有理的。[X. 19]

因为：DE与EG是长度可公度的，

因此：DG与每一条线段DE、EG也是长度可公度的。[X. 15]

因为：DG是有理的，并且与AC是长度不可公度的，

所以：每一条线段DE、EG也是有理的，并且与AC长度不可公度，[X. 13]

所以：每一个矩形DH、EK是中项面。[X. 21]

作正方形LM等于AI，从中减去与它有共同角LPM，并且等于FK的正方形NO，

因此：两正方形LM、NO有共同的对角线，

PR是它们的对角线，并作图。[VI. 26]

因为：AF、FG围成的矩形等于EG上的正方形，

因此：AF比EG如同EG比FG。[VI. 17]

因为：AF比EG如同AI比EK，

且EG比FG如同EK比KF，[VI. 1]

所以：EK是AI、KF的比例中项。[V. 11]

又因，已经证明：MN也是LM、NO的比例中项，[X. 53后引理]

并且AI等于正方形LM，而KF等于NO，

因此：MN等于EK。

因为：EK等于DH，且MN等于LO，

所以：DK等于折尺形UVW与NO的和。

因为：AK等于正方形LM、NO之和，

所以：余量AB等于ST。

因为：ST等于LN，

因此：LN上的正方形等于AB，

所以：LN是AB的边。

接下来可以证明：LN是一条余线。

因为：每一个矩形AI、FK是有理的，且它们分别等于LM、NO，

因此：每个正方形LM、NO，也就是分别为LP、PN上的正方形也是有理的，

所以：每一条线段LP、PN也是有理的。

因为：DH是中项面，并且等于LO，

所以：LO也是中项面。

因为：LO是中项面，且NO是有理的，

因此：LO与NO不可公度。

因为：LO比NO如同LP比PN，[VI. 1]

所以：LP比PN是长度不可公度的，[X. 11]

并且二者都是有理的，

因此：LP、PN是仅正方可公度的两有理线段，

所以：LN是一条余线，[X. 73]

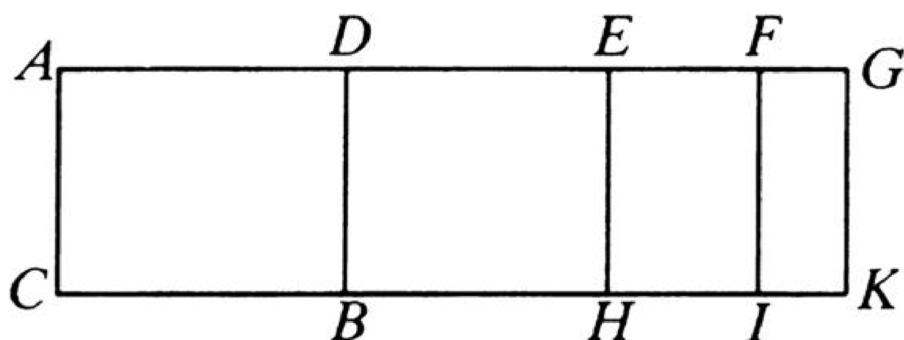
并且它是面AB的边，因此面AB的边是一条余线。

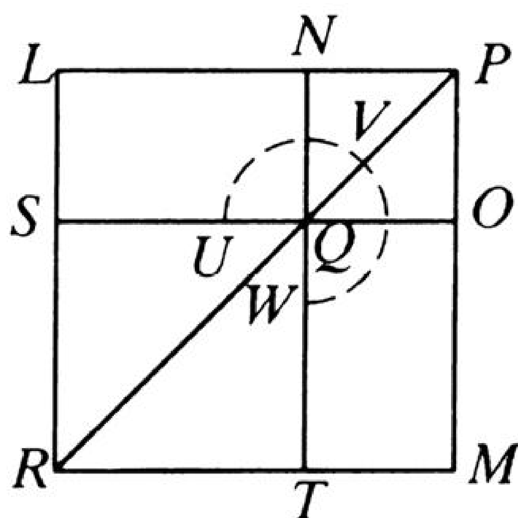
证完。

命题92

…

假如一个面是由一条有理线段与一个第二余线围成的矩形，那么这个面的边是一个第一中项余线。





设：面AB是由有理线段AC和第二余线AD围成的矩形。

那么可以说：面AB的边是一个中项线的第一余线。

那么，设：DG是加到AD上的附加线段，

因此：AG、GD是仅正方可公度的有理线段。[X. 73]

又设：附加线段DG与所给出的有理线段AC是可公度的，

并且全线段AG上的正方形比附加线段GD上的正方形大一个与AG是长度可公度的线段上的正方形，[X. 定义III. 2]

因此：AG上的正方形比GD上的正方形大一个与AG可公度的线段上的正方形，

因此：倘若在AG上贴合一个等于GD上的正方形的四分之一且缺少一正方形的矩形，那么它分AG为可公度的两段。[X. 17]

设：DG被点E平分，在AG上贴合一个等于EG上的正方形并且缺少一正方形的矩形AF、FG，令AF与FG是长度可公度的，

因此：AG与每一条线段AF、FG也是长度可公度的。[X. 15]

因为：AG是有理的且与AC是长度不可公度的，

因此：每一条线段AF、FG也是有理的且与AC是长度不可公度的，[X. 13]

所以：每一个矩形AI、FK是中项面。[X. 21]

因为：DE与EG是可公度的，

所以：DG与每一条线段DE、EG也是可公度的。[X. 15]

因为：DG与AC是长度可公度的，

所以：每一个矩形DH、EK是有理的。[X. 19]

作正方形LM等于AI，再减去等于FK且与LM有公共角LPM的正方形NO，

因此：LM、NO的对角线相同。

设：PR是它们的对角线，并作图，[VI. 26]

因为：AI、FK都是中项面并且分别等于LP、PN上的正方形，

所以：LP、PN上的正方形也都是中项面，

因此：LP、PN也是仅正方可公度的两中项线。

因为：矩形AF、FG等于EG上的正方形，

因此：AF比EG如同EG比FG。[VI. 17]

因为：AF比EG如同AI比EK，

并且EG比FG如同EK比FK，[VI. 1]

因此：EK是AI、FK的比例中项。[V. 11]

又因：MN也是两正方形LM、NO的比例中项，

且AI等于LM，而FK等于NO，

所以：MN等于EK。

因为：DH等于EK，且LO等于MN，

所以：整体DK等于折尺形UVW与NO的和。

因为：整体AK等于LM、NO的和，

且DK等于折尺形UVW与NO的和，

因此：余量AB等于TS。

又因：TS等于LN上的正方形，

因此：LN上的正方形等于面AB，

所以：LN等于面AB的边。

接下来可以证明：LN是一个中项线的第一余线。

因为：EK是有理线段，且EK等于LO，

因此：LO，也就是矩形LP、PN是有理的。

又因，已经证明：NO是一个中项面，

所以：LO与NO是不可公度的。

因为：LO比NO如同LP比PN，[VI. 1]

因此：LP、PN是长度不可公度的，[X. 11]

因此：LP、PN是仅正方可公度的两中项线，

并且由它们围成的矩形LO是有理的，

所以：LN是一个中项线的第一余线。[X. 74]

又因：它等于面AB的边，

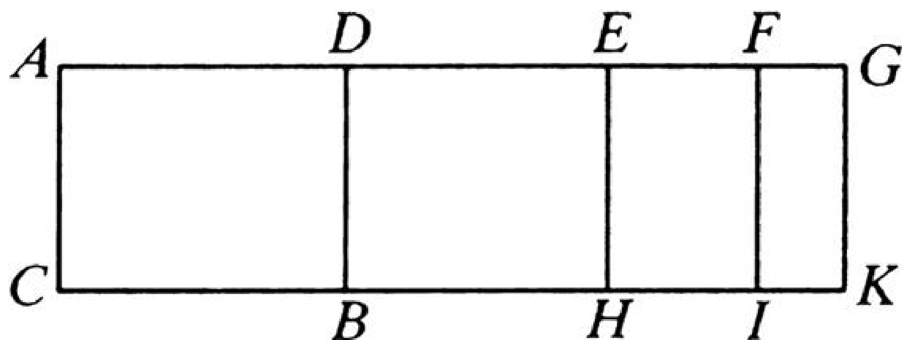
所以：面AB的边是一个第一中项余线。

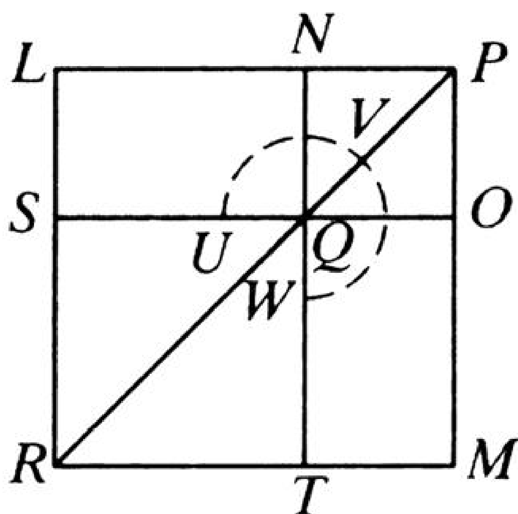
证完。

命题93

…

假如一个面是由一条有理线段与一个第三余线围成的矩形，那么这个面的边是一个中项线的第二余线。





设：*AB*是由有理线段*AC*和第三余线*AD*围成的矩形。

那么可以说：面*AB*的边是一个中项线的第二余线。

设：*DG*是加到*AD*上的附加线段，

因此：*AG*、*GD*是仅正方可公度的两有理线段，且每一条线段*AG*、*GD*与所给出的有理线段*AC*不是长度可公度的，

全线段*AG*上的正方形比附加线段*DG*上的正方形大一个与*AG*是可公度的线段上的正方形。[X. 定义III. 3]

因为：*AG*上的正方形比*GD*上的正方形大一个与*AG*是可公度的线段上的正方形，

因此：倘若在*AG*上贴合一个等于*DG*上的正方形的四分之一并且缺

少一正方形的矩形，那么它分AG为可公度的两段。[X. 17]

设：DG被点E平分，在AG上贴合一个等于EG上的正方形且缺少一正方形的矩形，令其为矩形AF、FG，

过点E、F、G作EH、FI、GK平行于AC，

那么：AF、FG是可公度的，

所以：AI与FK也是可公度的。[VI. 1，X. 11]

因为：AF、FG是长度可公度的，

因此：AG与每一条线段AF、FG也是长度可公度的。[X. 15]

因为：DG是有理的且与AC是长度不可公度的，

因此：AF、FG也都是有理的且与AC是长度不可公度的，[X. 13]

所以：两矩形AI、FK都是中项面。[X. 21]

因为：DE与EG是长度可公度的，

所以：DG与每一条线段DE、EG也是长度可公度的。[X. 15]

因为：GD是有理的且与AC是长度不可公度的，

所以：每一条线段DE、EG也是有理的，

并且与AC是长度不可公度的，[X. 13]

因此：两矩形DH、HK都是中项面。[X. 21]

因为：AG、GD是仅正方可公度的，

所以：AG与GD是长度不可公度的。

因为：AG与AF是长度可公度的，

且DG与EG是长度可公度的，

因此：AF与EG是长度不可公度的。[X. 13]

因为：AF比EG如同AI比EK，[VI. 1]

因此：AI与EK是不可公度的。[X. 11]

作正方形LM等于AI，从中减去正方形NO等于FK，使它与LM有相同的角LPM，

因此：LM、NO有共线的对角线。

设：PR是它们的对角线，作图。[VI. 26]

因为：矩形AF、FG等于EG上的正方形，

因此：AF比EG如同EG比FG。[VI. 17]

又因：AF比EG如同AI比FK，

且EG比FG如同EK比FK，[V. 1]

所以：AI比EK如同EK比FK，[V. 11]

因此：EK是AI、FK的比例中项。

因为：MN也是两正方形LM、NON的比例中项，

而AI等于LM，FK等于NO，

因此：EK等于MN。

因为：MN等于LO，且EK等于DH。

所以：整体DK等于折尺形UVW与NO的和。

因为：AK等于LM、NO的和，

所以：余量AB等于ST，也就是LN上的正方形，

因此：LN等于面AB的边。

接下来可以证明：LN是一个中项线的第二余线。

由于已经证明：AI、FK是中项面，分别等于LP、PN上的正方形，

所以：LP、PN上的正方形也都是中项面，

因此：每条线段LP、PN是中项线。

因为：AI与FK是可公度的，[VI. 1，X. 11]

所以：LP上的正方形与PN上的正方形也是可公度的。

又因，已经证明：AI与EK不可公度，

所以：LM与MN也不可公度，

也就是LP上的正方形与矩形LP、PN不可公度，

所以：LP与PN也是长度不可公度，[VI. 1，X. 11]

因此：LP、PN是仅正方可公度的两中项线。

接下来可以证明：它们也围成一个中项面。

由于已经证明：EK是一个中项面，并且等于矩形LP、PN，

因此：矩形LP、PN也是中项面，

所以：LP、PN是仅正方可公度的两中项线，并且它们也围成一个中项面，

因此：LN是一个中项线的第二余线，[X. 75]

且它等于AB的边，

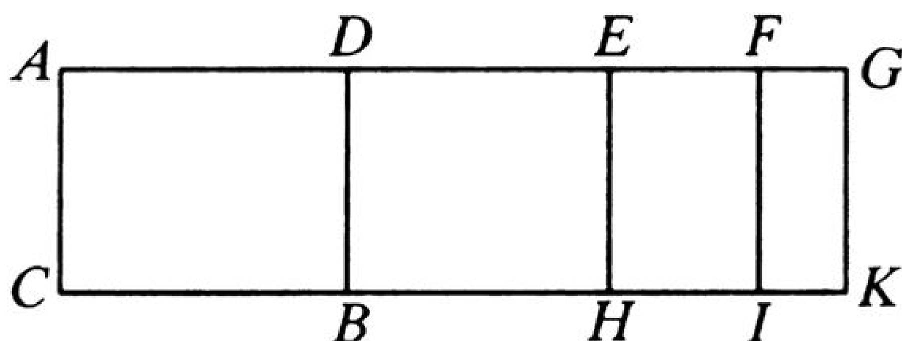
因此：面AB的边是一个中项线的第二余线。

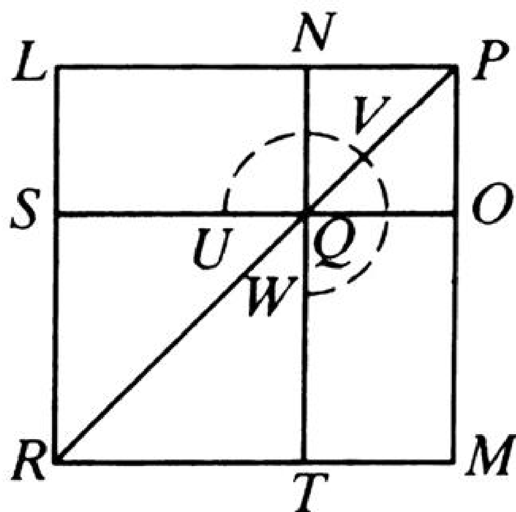
证完。

命题94

…

假如一个面是由一条有理线段与一个第四余线围成的，那么这个面的边是次线。





设：AB是由一条有理线段AC与一个第四余线AD围成的矩形。

那么可以说：面AB的边是次线。

设：DG是对AD的附加线段；

因此：AG、GD是仅正方可公度的两有理线段，AG与所给出的有理线段AC是长度可公度的，且全线段AG上的正方形比附加线段DG上的正

方形大一个与AG是长度不可公度的线段上的正方形。[X. 定义III. 4]

因为：AG上的正方形比GD上的正方形大一个与AG是长度不可公度的线段上的正方形，

因此：倘若在AG上贴合一个等于DG上的正方形的四分之一且缺少一正方形的矩形，它把AG分为不可公度的两段。[X. 18]

设：DG被点E平分，在AG上贴合一个等于EG上的正方形且缺少一正方形的矩形，是矩形AF、FG，

因此：AF与FG是长度不可公度的。

过点E、F、G引EH、FI、GK平行于AC、BD。

因为：AG是有理的，且与AC是长度可公度的，

因此：整体AK是有理的。[X. 19]

因为：DG与AC是长度不可公度的，且两者都是有理的，

所以：DK是中项面。[X. 21]

因为：AF与FG是长度不可公度的，

所以：AI与FK也是不可公度的。[VI. 1，X. 11]

作正方形LM等于AI，从中减去正方形NO等于FK，它与LM有相同角LPM，

因此：LM、NO的对角线相同。[VI. 26]

设：对角线是PR，并作图。

因为：矩形AF、FG等于EG上的正方形，

因此，按比例：AF比EG如同EG比FG。[VI. 17]

因为：AF比EG如同AI比EK，

且EG比FG如同EK比FK，[VI. 1]

因此：EK是AI、FK的比例中项。[V. 11]

因为：MN也是两正方形LM、NO的比例中项，且AI等于LM，FK等于NO，

因此：EK等于MN。

因为：DH等于EK，而LO等于MN，

因此：整体DK等于折尺形UVW与NO的和。

因为：整体AK等于正方形LM、NO的和，

DK等于折尺形UVW与正方形NO的和，

所以：余量AB等于ST，也就是LN上的正方形，

因此：LN等于面AB的边。

接下来可以证明：LN是所谓次线的无理线段。

因为：AK是有理的，并且等于LP、PN上的正方形的和，

因此：LP、PN上的正方形的和是有理的。

又因：DK是中项面，且DK等于二倍的矩形LP、PN，

因此：二倍的矩形LP、PN是中项面。

又因，已经证明：AI与FK是不可公度的，

所以：LP上的正方形与PN上的正方形也是不可公度的，

因此：LP、PN是正方形不可公度的两线段，并且它们上的正方形的和是有理的。

因为：由它们围成的矩形的二倍是中项面，

因此：LN是所谓次线的无理线段，[X. 76]

并且LN等于面AB的边，

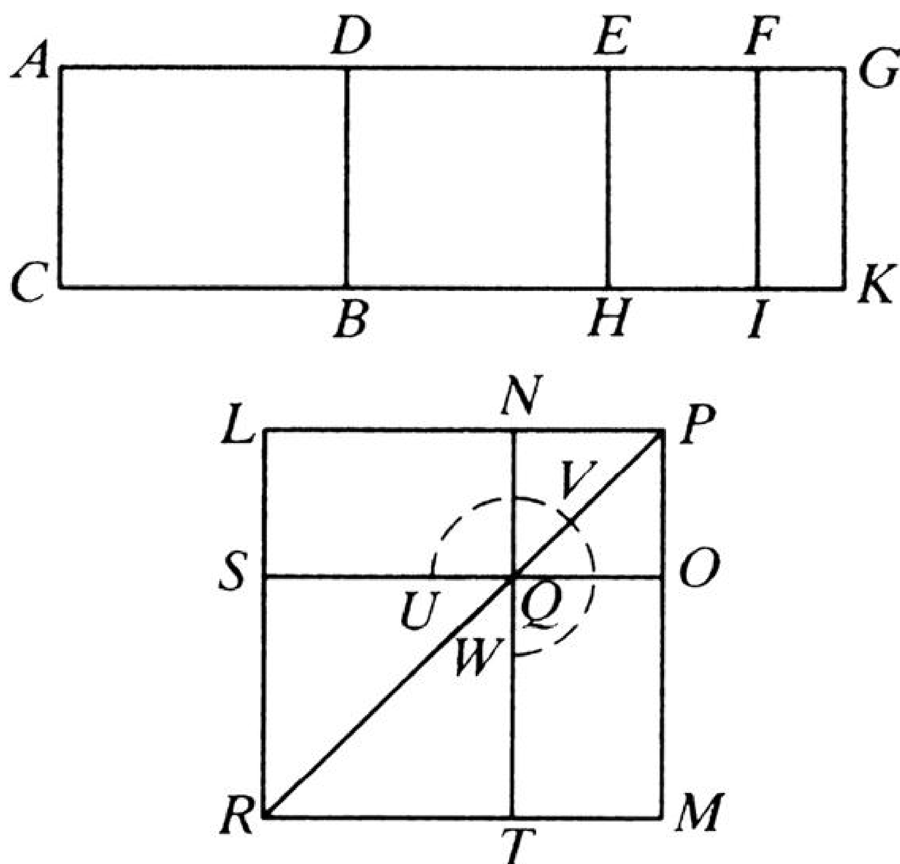
所以：面AB的边是次线。

证完。

命题95

…

假如一个面是由一条有理线段与一个第五余线围成的，那么这个面的边是一个中项面有理面差的边。



设：面AB是由有理线段AC和第五余线AD围成的矩形。

那么可以说：面AB的边是一个中项面有理面差的边。

设：DG是对AD上的附加线段，

因此：AG、GD是仅正方可公度的两有理线段，

附加线段GD与所给定的有理线段AC是长度可公度的，全线段AG上的正方形比附加线段DG上的正方形大一个与AG是不可公度的线段上的正方形，[X. 定义III. 5]

因此：假如在AG上贴合一个等于DG上的正方形的四分之一且缺少一正方形的矩形，那么它分AG为不可公度的两段。[X. 18]

设：DG被点E平分，在AG贴合一个等于EG上的正方形且缺少一正方形的矩形。

设：它为矩形AF、FG，

因此：AF与FG是长度不可公度的。

因为：AG与CA是长度不可公度的，且两者都是有理的，

所以：AK是中项面。[X. 21]

因为：DG是有理的，并且与AC是长度可公度的，

因此：DK是有理的，[X. 19]

作正方形LM等于AI，减去正方形NO等于FK，且它与LM有相同角LPM，

因此：LM、NO的对角线相同。[VI. 26]

设：PR是它们的对角线，并作图。

同理可证：LN与面AB的边相等。

接下来可以证明：LN是一个中项面有理面差的边。

已经证明：AK是中项面且等于LP、PN上的正方形的和，

因此：LP、PN上的正方形的和是中项面。

因为：DK是有理的且等于二倍的矩形LP、PN，

所以：后者也是有理的。

因为：AI与FK是不可公度的，

所以：LP上的正方形与PN上的正方形也是不可公度的，

因此：LP、PN是正方形不可公度的两条线段，

且它们上的正方形的和是中项面，由它们围成的矩形的二倍是有理的，

所以：余量LN是称为中项面有理面差的边的无理线段，[X. 77]

并且等于面AB的边，

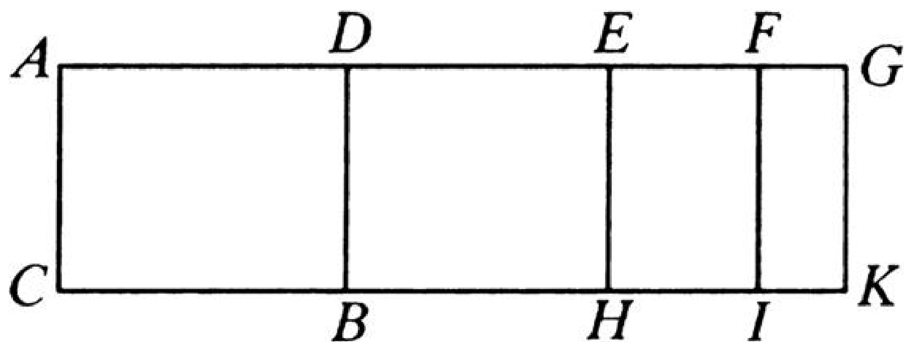
因此：面AB的边是一个中项面有理面差的边。

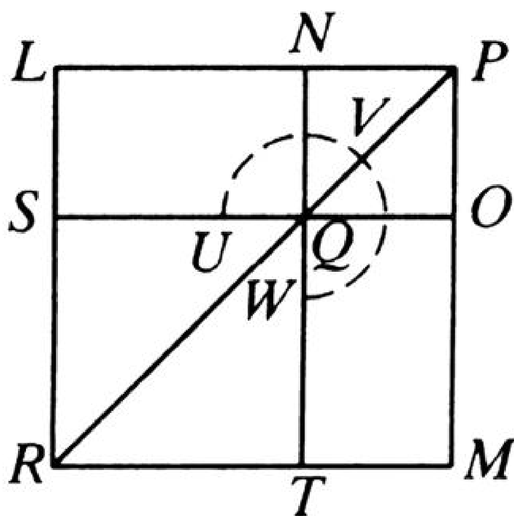
证完。

命题96

…

假如一个面是由一条有理线段与一个第六余线围成的，那么这个面的边是一个两中项面差的边。





设：面*AB*是由有理线段*AC*和第六余线*AD*围成的矩形。

那么可以说：面*AB*的边是一个两中项面差的边。

设：*DG*是*AD*上的附加线段，

因此：*AG*、*GD*是仅正方可公度的两有理线段，它们的每一个与所给定的有理线段*AC*不是长度可公度的，且全线段*AG*上的正方形比附加线段*DG*上的正方形大一个与*AG*是长度不可公度的线段上的正方形。[X.定义III]

因为：*AG*上的正方形比*GD*上的正方形大一个与*AG*是长度不可公度的线段上的正方形，

因此：倘若在*AG*上贴合一个等于*DG*上的正方形的四分之一且缺少

一正方形的矩形，那么它分AG为不可公度的两段。[X. 18]

设：DG被点E平分，对AG贴合一个等于EG上的正方形且缺少一正方形的矩形，矩形是AF、FG，

所以：AF与FG是长度不可公度的。

因为：AF比FG如同AI比FK，[VI. 1]

所以：AI与FK是不可公度的。[X. 11]

因为：AG、AC是仅正方可公度的两有理线段，

因此：AK是中项面。[X. 21]

因为：AC、DG是长度不可公度的有理线段，

所以：DK是中项面。[X. 21]

因为：AG、GD是仅正方可公度的，

所以：AG与GD是长度不可公度的。

因为：AG比GD如同AK比KD，[VI. 1]

因此：AK与KD是不可公度的。[X. 11]

作正方形LM等于AI，并在其内作正方形NO等于FK，且它与LM有相同角LPM，

所以：LM、NO的对角线相同。[VI. 26]

设：PR是它们的对角线，并作图。

同理可证：LN与面AB的边相等。

接下来可以证明：LN是一个两中项面差的边。

由于已经证明：AK是一个中项面且等于LP、PN上的正方形的和，

所以：LP、PN上的正方形的和是一个中项面。

又因，已经证明：DK是中项面且等于二倍的矩形LP、PN，

因此：二倍矩形LP、PN也是中项面。

又因，已经证明：AK与DK是不可公度的，LP、LN上的正方形的和与二倍的矩形LP、PN也是不可公度的，

因为：AI与FK是不可公度的，

所以：LP上的正方形与PN上的正方形也是不可公度的，

因此：LP、PN是正方不可公度的线段，

并且使它们上的正方形的和是中项面。

因为：它们围成的矩形的二倍是中项面，并且它们上的正方形的和与由它们围成的矩形的二倍是不可公度的。

因此：LN是一个被称之为两中项面差的边的无理线段，[X. 78]

并且它等于面AB的边，

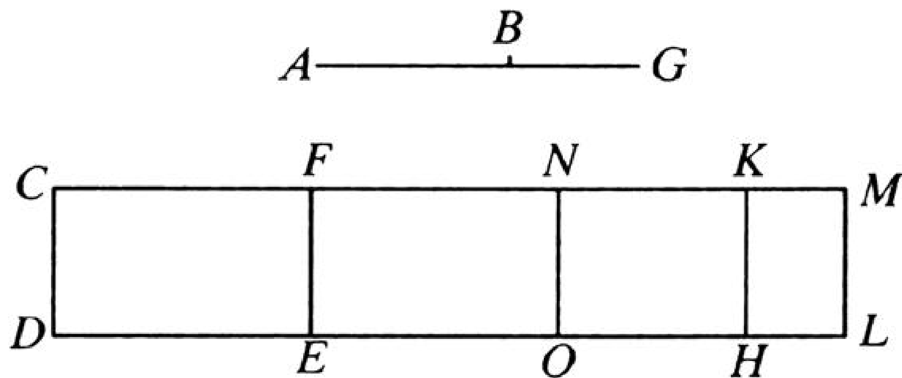
所以：面AB的边是一个两中项面差的边。

证完。

命题97

…

对有理线段贴合一个矩形，使它等于一条余线上的正方形，所产生的宽是一个第一余线。



设：已知余线AB，有理线段CD，现对CD贴合等于AB上的正方形的矩形CE，产生出作为宽的CF。

那么可以说：CF是一个第一余线。

设：BG是对AB的附加线段，

因此：AG、GB是仅正方可公度的两有理线段。[X. 73]

对CD贴合矩形CH，使它等于AG上的正方形，

作KL，使它等于BG上的正方形，

所以：CL等于AG、GB上的正方形的和，CE等于AB上的正方形，

因此：余下的FL等于二倍的矩形AG、GB。[II. 7]

设：FM被点N平分，过N引NO平行于CD，

因此：每一个矩形FO、LN等于矩形AG、GB。

因为：AG、GB上的正方形都是有理的，且DM等于AG、GB上的正方形的和，

因此：DM是有理的。

因为：DM是贴合于有理线段CD上，产生出作为宽的CM，

所以：CM是有理的，且与CD是长度可公度的。[X. 20]

因为：二倍的矩形AG、GB是中项面，且FL等于二倍的矩形AG、GB，

所以：FL是中项面。

又因：FL是贴合于有理线段CD上，产生出作为宽的FM，

因此：FM是有理的，并且与CD是长度不可公度的。[X. 22]

因为：AG、GB上的正方形都是有理的，

而二倍的矩形AG、GB是中项面，

因此：AG、GB上的正方形和与二倍矩形AG、GB不可公度。

因为：CL等于AG、GB上的正方形的和，FL等于二倍的矩形AG、GB，

所以：DM与FL是不可公度的。

又因：DM比FL如同CM比FM，[VI. 1]

因此：CM与FM是长度不可公度的。[X. 11]

因为：两者都是有理的，

所以：CM、MF是仅正方可公度的两有理线段，

所以：CF是一条余线。[X. 73]

接下来可以证明：CF也是一个第一余线。

因为：矩形AG、GB是AG、GB上的正方形的比例中项，且CH等于AG上的正方形，KL等于BG上的正方形，NL等于矩形AG、GB，

因此：NL也是CH、KL的比例中项，

所以：CH比NL如同NL比KL。

因为：CH比NL如同CK比NM，[VI. 1]

并且NL比KL如同NM比KM，

所以：矩形CK、KM等于NM上的正方形，[VI. 17]

也就是FM上的正方形的四分之一。

因为：AG上的正方形与GB上的正方形是可公度的，

所以：CH与KL也是可公度的。

因为：CH比KL如同CK比KM，[VI. 1]

因此：CK与KM是可公度的。[X. 11]

因为：CM、MF是两个不相等的线段，

并且对CM贴合等于FM上的正方形的四分之一且缺少一正方形的矩形CK、KM，

又因：CK与KM是可公度的，

所以：CM上的正方形比MF上的正方形大一个与CM是长度可公度的线段上的正方形。[X. 17]

因为：CM与所给定的有理线段CD是长度可公度的，

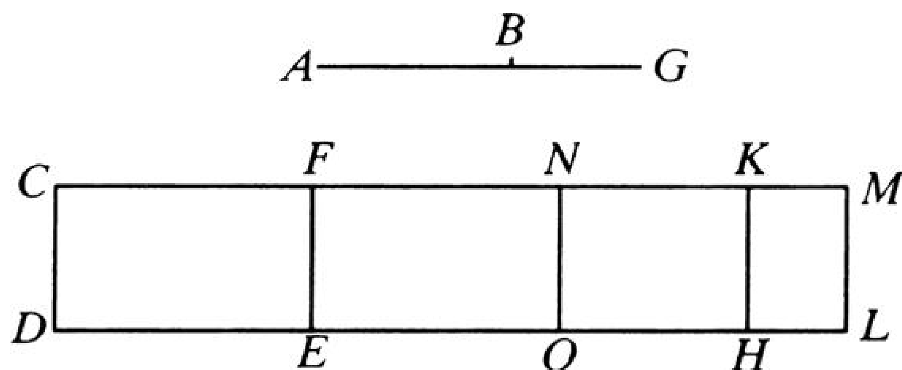
因此：CF是一个第一余线。[X. 定义III. 1]

证完。

命题98

…

对有理线段贴合一矩形，使其等于中项线第一余线上的正方形，那么所产生的宽是一个第二余线。



设：AB是一个中项线的第一余线，CD是一条有理线段，对CD贴合一矩形CE，使其等于AB上的正方形，所产生出的宽是CF。

那么可以说：CF是一个第二余线。

设：BG是对AB的附加线段，

因此：AG、GB是仅正方可公度的两中项线，且由它们围成一个有理矩形。[X. 74]

设：在CD上贴合矩形CH等于AG上的正方形，所产生的宽是CK，并且KL等于GB上的正方形，所产生的宽是KM，

所以：整体CL等于AG、GB上的正方形的和，

因此：CL也是中项面，[X. 15和23，推论]，

并且它是贴合于有理线段CD上，所产生的宽是CM，

因此：CM是有理的，并且与CD是长度不可公度的。[X. 22]

因为：CL等于AG、GB上的正方形的和，且AB上的正方形等于CE，

所以：余下的二倍矩形AG、GB等于FL。[II. 7]

因为：二倍的矩形AG、GB是有理的，

因此：FL是有理的。

因为：它是贴合于有理线段*FE*上，所产生的宽是*FM*，

因此：*FM*也是有理的，并且与*CD*是长度可公度的。[X. 20]

因为：*AG*、*GB*上的正方形的和，也就是*CL*是中项面，

且二倍的矩形*AG*、*GB*，也就是*FL*是有理的，

因此：*CL*与*FL*是不可公度的。

又因：*CL*比*FL*如同*CM*比*FM*，[VI. 1]

因此：*CM*与*FM*是长度不可公度的，[X. 11]

并且两者都是有理的，

因此：*CM*、*MF*是仅正方可公度的两有理线段，

所以：*CF*是一条余线。[X. 73]

接下来可以证明：*CF*也是一个第二余线。

设：*FM*被点*N*平分，过*N*引*NO*平行于*CD*，

那么：每一个矩形*FO*、*NL*等于矩形*AG*、*GB*。

因为：矩形*AG*、*GB*是*AG*、*GB*上的正方形的比例中项，

并且*AG*上的正方形等于*CH*，矩形*AG*、*GB*等于*NL*，以及*BG*上的正方形等于*KL*，

因此：*NL*也是*CH*、*KL*的比例中项，

所以：*CH*比*NL*如同*NL*比*KL*。

因为：*CH*比*NL*如同*CK*比*NM*，

且*NL*比*KL*如同*NM*比*MK*，[VI. 1]

所以：*CK*比*NM*如同*NM*比*KM*，[VI. 11]

所以：矩形CK、KM等于NM上的正方形。[VI. 17]

也就是FM上的正方形的四分之一。

因为：CM、FM是两个不相等的线段，

且矩形CK、KM是贴合于大线段CM上等于MF上的正方形的四分之一并且缺少一正方形，

又分CM为可公度的两段，

所以：CM上的正方形比MF上的正方形大一个与CM是长度可公度的线段上的正方形，[X. 17]

并且附加线段FM与所给定的有理线段CD是长度可公度的，

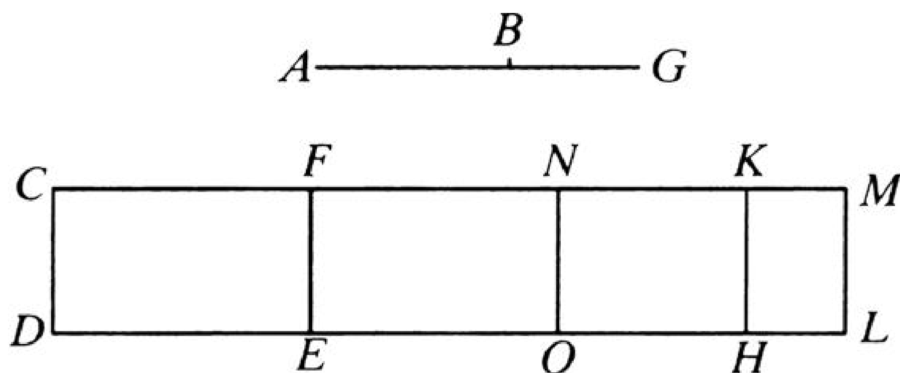
因此：CF是一个第二余线。[X. 定义III. 2]

证完。

命题99

…

对一条有理线段贴合一矩形，等于中项线第二余线上的正方形，那么所产生的宽是第三余线。



设：AB是一个中项线的第二余线，CD是有理线段，

在CD上贴合一矩形CE，等于AB上的正方形，所产生的宽是CF。

那么可以说：CF是一个第三余线。

设：BG是AB上的附加线段，

因此：AG、GB是仅正方可公度的两中项线，由它们围成一个矩形为中项面。[X. 75]

设：CH是贴合于CD上，并且等于AG上的正方形的矩形，所产生的宽是CK，

且KL是贴合于KH上且等于BG上的正方形的矩形，所产生的宽是KM，

所以：CL等于AG、GB上的正方形的和，

因此：CL也是中项面。[X. 15和23，推论]

因为：它是贴合于有理线段CD上，所产生的宽是CM，

所以：CM是有理的，且与CD是长度不可公度的。[X. 22]

因为：CL等于AG、GB上的正方形的和，CE等于AB上的正方形，

因此：余下的LF等于二倍的矩形AG、GB。[II. 7]

设：FM被点N平分，作NO平行于CD，

所以：每一个矩形FO、NL等于矩形AG、GB。

因为：矩形AG、GB是中项面，

所以：FL也是中项面。

又因：它是贴合于有理线段EF上的，所产生的宽是FM，

因此：FM也是有理的，且与CD是长度不可公度的。[X. 22]

因为：AG、GB是仅正方可公度的，

所以：AG与GB是长度不可公度的，

所以：AG上的正方形与矩形AG、GB也是不可公度的。[VI. 1，X. 11]

因为：AG、GB上的正方形的和与AG上的正方形是可公度的，

二倍的矩形AG、GB与矩形AG、GB是可公度的，

因此：AG、GB上的正方形的和与二倍矩形AG、GB是不可公度的。[X. 13]

因为：CL等于AG、GB上的正方形的和，

FL等于二倍的矩形AG、GB，

所以：CL与FL也是不可公度的。

因为：CL比FL如同CM比FM，[VI. 1]

所以：CM与FM是长度不可公度的。[X. 11]

并且两者都是有理的，

因此：CM、MF是仅正方可公度的两有理线段，

所以：CF是一条余线。[X. 73]

接下来可以证明：它也是一个第三余线。

因为：AG上的正方形与GB上的正方形是可公度的，

所以：CH与KL也是可公度的，

因此：CK与KM也是可公度的。[VI. 1，X. 11]

因为：矩形AG、GB是AG、GB上的正方形的比例中项，

CH等于AG上的正方形，KL等于GB上的正方形，NL等于矩形AG、GB，

所以：NL也是CH、KL的比例中项，

所以：CH比NL如同NL比KL。

因为：CH比NL如同CK比NM，

且NL比KL如同NM比KM，[VI. 1]

因此：CK比MN如同MN比KM，[V. 11]

所以：矩形CK、KM等于MN上的正方形，也就是等于FM上的正方形的四分之一。

因为：CM、MF是不相等的两条线段，

在CM上贴合一等于FM上的正方形的四分之一并且缺少一正方形的矩形，

分CM为可公度的两段，

所以：CM上的正方形比MF上的正方形大一个与CM是可公度的线段上的正方形。[X. 17]

又因：每一条线段CM、MF与所给定的有理线段CD是长度不可公度的，

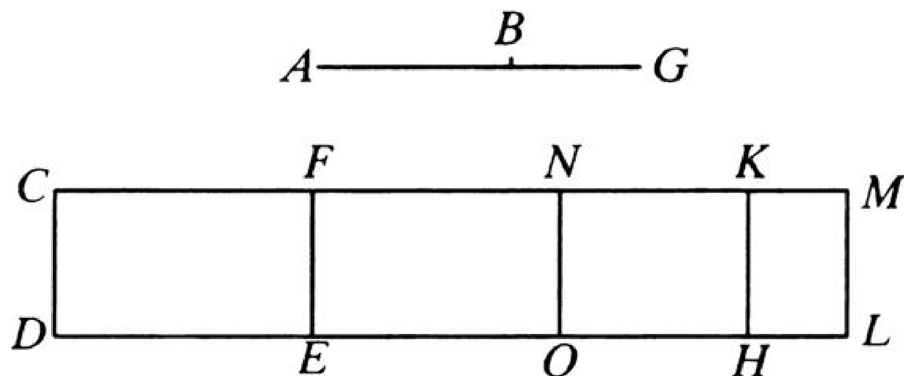
所以：CF是一个第三余线。[X. 定义III. 3]

证完。

命题100

…

对一条有理线段贴合一矩形等于次线上的正方形，那么所产生的宽是一个第四余线。



设：*AB*是一个次线，*CD*是一条有理线段。

在有理线段*CD*上贴合一矩形*CE*等于*AB*上的正方形，产生出作为宽的*CF*。

那么可以说：*CF*是一个第四余线。

设：*BG*是*AB*上的附加线段，

因此：*AG*、*GB*是正方不可公度的两线段，

并且*AG*、*GB*上的正方形的和是有理的，二倍的矩形*AG*、*GB*是中项面。[X. 76]

设：在*CD*上贴合一矩形*CH*等于*AG*上的正方形，产生出作为宽的*CK*，作矩形*KL*等于*BG*上的正方形，产生出作为宽的*KM*，

因此：整体*CL*等于*AG*、*GB*上的正方形的和。

因为：*AG*、*GB*上的正方形的和是有理的，

因此：*CL*也是有理的，

并且是贴合一有理线段*CD*上的，产生出作为宽的*CM*，

所以：*CM*也是有理的，与*CD*是长度可公度的。[X. 20]

因为：整体*CL*等于*AG*、*GB*上的正方形的和，其中*CE*等于*AB*上的正方形，

因此：余下的FL等于二倍的矩形AG、GB。[II. 7]

设：FM被点N平分，过点N引NO平行于直线CD、ML，

所以：每一个矩形FO、NL等于矩形AG、GB。

因为：二倍的矩形AG、GB是中项面且等于FL，

因此：FL也是中项面。

因为：它是贴合一有理线段FE上，产生出作为宽的FM，

因此：FM是有理的，并且与CD是长度不可公度的。[X. 22]

因为：AG、GB上的正方形的和是有理的，

而二倍的矩形AG、GB是中项面，

因此：AG、GB上的正方形的和与二倍矩形AG、GB是不可公度的。

因为：CL等于AG、GB上的正方形的和，

FL等于二倍的矩形AG、BG，

所以：CL与FL是不可公度的。

因为：CL比FL如同CM比MF，[VI. 1]

因此：CM与MF是长度不可公度的。[X. 11]

又因：二者都是有理的，

因此：CM、MF是仅正方可公度的有理线段，

所以：CF是一条余线。[X. 73]

接下来可以证明：CF也是一个第四余线。

因为：AG、GB是正方不可公度的，

因此：AG上的正方形与GB上的正方形也是不可公度的。

又因：CH等于AG上的正方形，KL等于GB上的正方形，

所以：CH与KL是不可公度的。

因为：CH比KL如同CK比KM，[VI. 1]

所以：CK与KM是长度不可公度的。[X. 11]

因为：矩形AG、GB是AG、GB上的正方形的比例中项，

且AG上的正方形等于CH、GB上的正方形且等于KL，又有矩形AG、GB等于NL，

因此：NL是CH、KL的比例中项，

所以：CH比NL如同NL比KL，

又因：CH比NL如同CK比NM，

并且NL比KL如同NM比KM，[VI. 1]

因此：CK比MN如同MN比KM，[VI. 11]

因此：矩形CK、KM等于MN上的正方形，[VI. 17]

也就是等于FM上的正方形的四分之一。

因为：CM、MF是不相等的线段，矩形CK、KM是贴合于CM上等于MF上的正方形的四分之一并且缺少一正方形，

它分CM为不可公度的两段，

因此：CM上的正方形比MF上的正方形大一个与CM不可公度的线段上的正方形，[X. 18]

并且全线段CM与所给定的有理线段CD是长度可公度的，

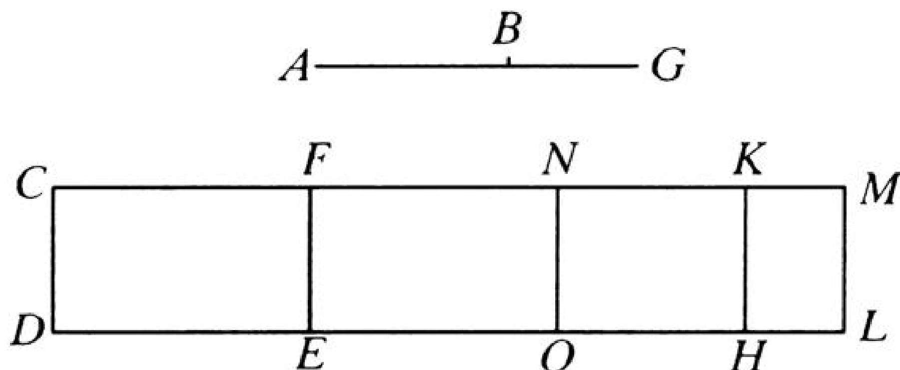
因此：CF是一个第四余线。[X. 定义III. 4]

证完。

命题101

…

在一条有理线段上贴合一矩形等于中项面有理面差的边的正方形，那么所产生的宽是一个第五余线。



设：*AB*是一个中项面有理面差的边，*CD*是一条有理线段，并在*CD*上贴合一个等于*AB*上的正方形的矩形*CE*，产生出作为宽的*CF*。

那么可以说：*CF*是一个第五余线。

设：*BG*是*AB*上的附加线段，

因此：*AG*、*GB*是正方不可公度的两条线段，它们上的正方形的和是中项面，

而二倍矩形*AG*、*GB*是有理面。[X. 77]

设：*CH*是在*CD*上贴合一个等于*AG*上的正方形的矩形，

*KL*等于*GB*上的正方形，

因此：*CL*等于*AG*、*GB*上的正方形的和。

因为：*AG*、*GB*上的正方形的和是中项面，

因此：CL是中项面，

并且它是贴合于有理线段CD上的，产生出作为宽的CM，

因此：CM是有理的，并且与CD是不可公度的。[X. 22]

因为：CL等于AG、GB上的正方形的和，而CE等于AB上的正方形，

所以：余下的FL等于二倍的矩形AG、GB。[II. 7]

设：FM被点N平分，过点N引NO平行于每一条线段CD、ML，

因此：每一个矩形FO、NL等于矩形AG、GB。

因为：二倍的矩形AG、GB是有理的，并且等于FL，

所以：FL是有理的。

因为：它是贴合于有理线段EF上，产生出作为宽的FM，

因此：FM是有理的，与CD是长度可公度的。[X. 20]

因为：CL是中项面，FL是有理面，

所以：CL与FL是不可公度的。

又因：CL比FL如同CM比MF，[VI. 1]

因此：CM与MF是长度不可公度的，[X. 11]，

并且两者都是有理的，

因此：CM、MF是仅正方可公度的两条有理线段，

所以：CF是一条余线。[X. 73]

接下来可以证明：CF也是一个第五余线。

同理可证：矩形CK、KM等于NM上的正方形，

也就是等于FM上的正方形的四分之一。

因为：AG上的正方形与GB上的正方形是不可公度的，

AG上的正方形等于CH，并且GB上的正方形等于KL，

因此：CH与KL是不可公度的，

所以：CH比KL如同CK比KM，[VI. 1]

因此：CK与KM是长度不可公度的。[X. 11]

因为：CM、MF是两条不相等的线段，在CM上贴合一等于FM上的正方形的四分之一且缺少一正方形的矩形，

它分CM为不可公度的两段，

因此：CM上的正方形较MF上的正方形大一个与CM是不可公度的线段上的正方形。[X. 18]

因为：附加线段FM与所给定的有理线段CD是可公度的，

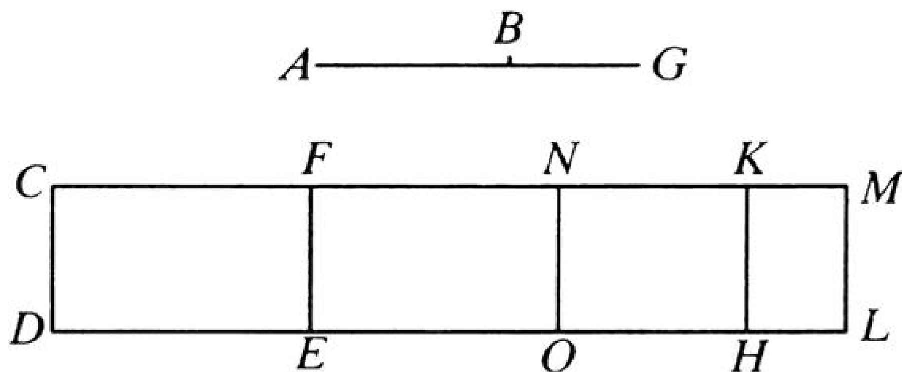
因此：CF是一个第五余线。[X. 定义III. 5]

证完。

命题102

…

在一条有理线段上贴合一矩形，使其等于两中项面差的边的正方形，那么所产生的宽是一个第六余线。



设：AB是一个两中项面差的边，CD是一条有理线段，

对CD贴合一矩形CE等于AB上的正方形，产生出作为宽的CF。

那么可以说：CF是一个第六余线。

设：BG是对AB的附加线段，

那么：AG、GB是正方不可公度的，

并且它们上的正方形的和是中项面，以及二倍矩形AG、GB是中项面，

而AG、GB上的正方形的和与二倍矩形AG、GB是不可公度的。[X. 78]

在CD上贴合一矩形CH等于AG上的正方形，产生出作为宽的CK，

并且KL等于BG上的正方形，

因此：整体CL等于AG、GB上的正方形的和，

所以：CL也是中项面。

又因：它是贴合在有理线段CD上，产生出作为宽的CM，

所以：CM是有理的，并且与CD是长度不可公度的。[X. 22]

因为：CL等于AG、GB上的正方形的和，其中CE等于AB上的正方

形，

因此：余下的FL等于二倍矩形AG、GB。[II. 7]

因为：二倍的矩形AG、GB是中项面，

因此：FL也是中项面。

又因：它是贴合于有理线段FE上，产生出作为宽的FM，

所以：FM是有理的，且与CD是长度不可公度的。[X. 22]

因为：AG、GB上的正方形的和与二倍矩形AG、GB是不可公度的，

并且CL等于AG、GB上的正方形的和，而FL等于二倍的矩形AG、GB，

所以：CL与FL是不可公度的。

因为：CL比FL如同CM比MF。[VI. 1]

所以：CM与MF是长度不可公度的。[X. 11]

并且两者都是有理的。

因此：CM、MF是仅正方可公度的两条有理线段，

所以：CF是一条余线。[X. 73]

接下来可以证明：CF也是一个第六余线。

因为：FL等于二倍的矩形AG、GB，

设：FM被点N平分，过点N引NO平行于CD，

因此：每一个矩形FO、NL等于矩形AG、GB。

因为：AG、GB是正方不可公度的，

所以：AG上的正方形与GB上的正方形是不可公度的。

因为：CH等于AG上的正方形，KL等于GB上的正方形，

所以：CH与KL也是不可公度的。

又因：CH比KL如同CK比KM，[VI. 1]

因此：CK与KM是不可公度的。[X. 11]

因为：矩形AG、GB是AG、GB上的正方形的比例中项，且CH等于AG上的正方形，KL等于GB上的正方形，还有NL等于矩形AG、GB，

因此：NL也是CH、KL的比例中项，

所以：CH比NL如同NL比KL。

同理：CM上的正方形比MF上的正方形大一个与CM是不可公度的线段上的正方形，[X. 18]

并且它们与所给定的有理线段CD是不可公度的，

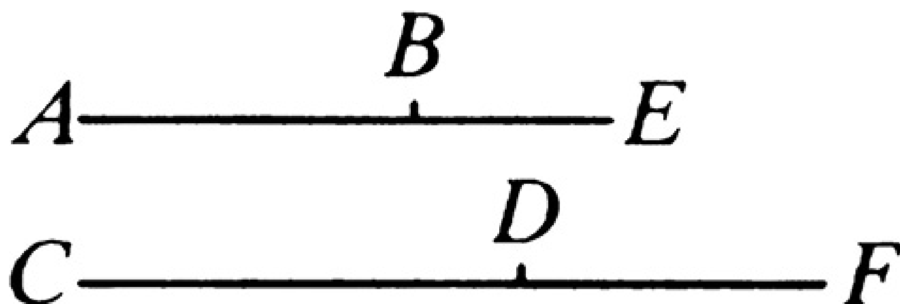
因此：CF是一个第六余线。[X. 定义III. 6]

证完。

命题103

…

与一条余线是长度可公度的线段仍是一条余线，并且有相同的等级。



设：*AB*是一条余线，而*CD*与*AB*是长度可公度的。

那么可以说：*CD*也是一条余线，并且与*AB*是同级的。

那么，设：*BE*是余线*AB*的附加线段，

因此：*AE*、*EB*是仅正方可公度的有理线段。[X. 73]

作*BE*与*DF*的比如同*AB*比*CD*，[VI. 12]

因此：一个比一个如同前项和比后项和，[V. 12]

所以：整体*AE*比整体*CF*如同*AB*比*CD*。

因为：*AB*与*CD*是长度可公度的，

因此：*AE*与*CF*也是可公度的，*BE*与*DF*也是可公度的。[X. 11]

因为：*AE*、*EB*是仅正方可公度的有理线段，

因此：*CF*、*FD*也是仅正方可公度的有理线段。[X. 13]

因为：*AE*比*CF*如同*BE*比*DF*，

因此，由更比：*AE*比*EB*如同*CF*比*FD*。[V. 16]

因为：*AE*上的正方形比*EB*上的正方形大一个与*AE*可公度线段上的正方形或大一个与它不可公度线段上的正方形，

假如：*AE*上的正方形比*EB*上的正方形大一个与*AE*是可公度的线段上的正方形，

那么：*CF*上的正方形比*FD*上的正方形大一个与*CF*也是可公度线段上的正方形。[X. 14]

假如：*AE*与所给定的有理线段是长度可公度的，

那么：*CF*与所给定的有理线段也是长度可公度的。[X. 12]

假如：*BE*与所给定的有理线段是长度可公度的，

那么：DF与所给定的有理线段也是长度可公度的。[X. 12]

假如：每一条线段AE、EB与所给定的有理线段不可公度，

那么：每一条线段CF、FD与所给定的有理线段也不可公度。[X. 13]

假如：AE上的正方形比EB上的正方形大一个与AE是不可公度的线段上的正方形，

那么：CF上的正方形比FD上的正方形大一个与CF不可公度的线段上的正方形。[X. 14]

假如：AE与所给定的有理线段是长度可公度的，

那么：CF与所给定的有理线段也是长度可公度的。

假如：BE与所给定的有理线段是长度可公度的，

那么：DF与所给定的有理线段也是长度可公度的。[X. 12]

假如：每条线段AE、EB与所给定的有理线段是不可公度的，

那么：每条线段CF、FD与所给定的有理线段也是不可公度的，[X. 13]

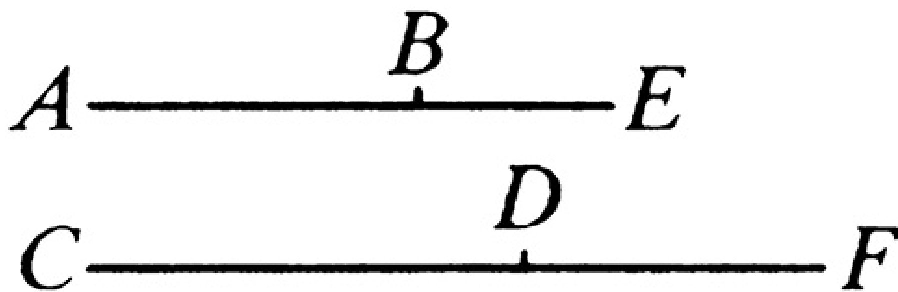
因此：CD是一条余线，并且与AB同级。

证完。

命题104

…

与一个中项余线是长度可公度的线段仍是一个中项线的余线，并且有相同的级。



设：已知一个中项余线*AB*，而*CD*与*AB*是长度可公度的。

那么可以说：*CD*也是一个中项余线，并且与*AB*是同级的。

因为：*AB*是一个中项线的余线，

那么，设：*EB*是对它的附加线段。

因此：*AE*、*EB*是仅正方可公度的两条中项线。[X. 74，75]

作比例：*AB*比*CD*如同*BE*比*DF*，[VI. 12]

因此：*AE*与*CF*也是可公度的，*BE*与*DF*也是可公度的。[V. 12，X. 11]

因为：*AE*、*EB*是仅正方可公度的两中项线，

因此：*CF*、*FD*也是仅正方可公度的两中项线，[X. 23，13]

所以：*CD*是一个中项线的余线。[X. 74，75]

接下来可以证明：*CD*与*AB*也是同级的。

因为：*AE*比*EB*如同*CF*比*FD*，

所以：*AE*上的正方形比矩形*AE*、*EB*如同*CF*上的正方形比矩形*CF*、*FD*。

因为：*AE*上的正方形与*CF*上的正方形是可公度的，

所以：矩形*AE*、*EB*与矩形*CF*、*FD*也是可公度的。[V. 16，X. 11]

设：矩形*AE*、*EB*是有理的，

那么：矩形*CF*、*FD*也是有理的。[X. 定义4]

假如：矩形*AE*、*EB*是中项面，

那么：矩形*CF*、*FD*也是中项面，[X. 23，推论]

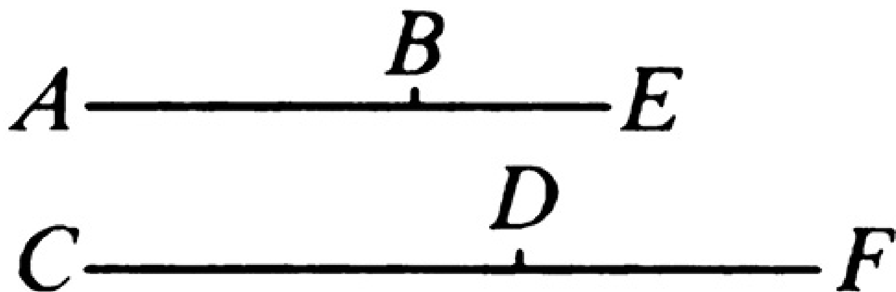
因此：*CD*是一个中项余线，与*AB*同级。[X. 74，75]

证完。

命题105

…

与一个次线可公度的线段仍是一个次线。



设：已知*AB*是一个次线，且*CD*与*AB*可公度。

那么可以说：*CD*也是一个次线。

同上作图。

因为：*AE*、*EB*是正方不可公度的，[X. 76]

因此：*CF*、*FD*也是正方不可公度的。[X. 13]

因为：*AE*比*EB*如同*CF*比*FD*，[V. 12，V. 16]

因此：*AE*上的正方形比*EB*上的正方形如同*CF*上的正方形比*FD*上的

正方形，[VI. 22]

因此：由合比：AE、EB上的正方形的和比EB上的正方形如同CF、FD上的正方形的和比FD上的正方形。[V. 18]

因为：BE上的正方形与DF上的正方形是可公度的，

所以：AE、EB上的正方形的和与CF、FD上的正方形的和也是可公度的。[V. 16，X. 11]

因为：AE、EB上的正方形的和是有理的，[X. 76]

因此：CF、FD上的正方形的和也是有理的。[X. 定义4]

因为：AE上的正方形比矩形AE、EB如同CF上的正方形比矩形CF、FD，而AE上的正方形与CF上的正方形是可公度的，

因此：矩形AE、EB与矩形CF、FD也是可公度的。

又因：矩形AE、EB是中项面，[X. 76]

所以：矩形CF、FD也是中项面，[X. 23，推论]

所以：CF、FD是正方不可公度的，并且它们上的正方形的和是有理的，由它们围成的矩形是中项面，

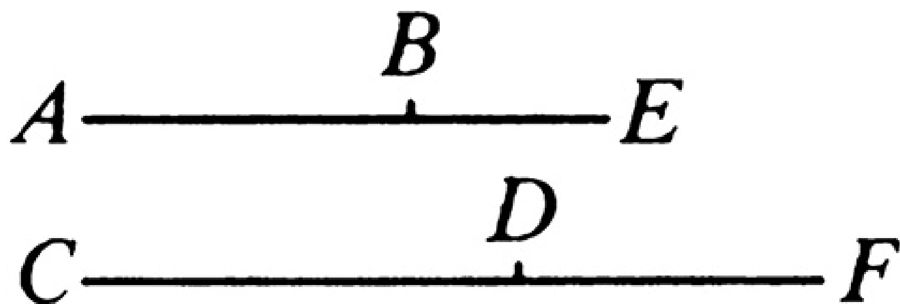
因而：CD是次线。[X. 76]

证完。

命题106

…

与一个中项面有理面差的边可公度的线段仍是一个中项面有理面差的边。



设：已知一个中项面有理面差的边*AB*，而*CD*与*AB*是可公度的。

那么可以说：*CD*也是一个中项面有理面差的边。

设：*BE*是*AB*上的附加线段，

那么：*AE*、*EB*是正方不可公度的两条线段，并且*AE*、*EB*上的正方形的和是中项面，由它们围成的矩形是有理的。[X. 77]

同上作图。

同理可证：*CF*与*FD*的比如同*AE*比*EB*；

AE、*EB*上的正方形的和与*CF*、*FD*上的正方形的和是可公度的；

且矩形*AE*、*EB*与矩形*CF*、*FD*是可公度的，

所以：*CF*、*FD*是正方不可公度的两线段，并且*CF*、*FD*上的正方形的和是中项面，而由它们围成的矩形是有理的，

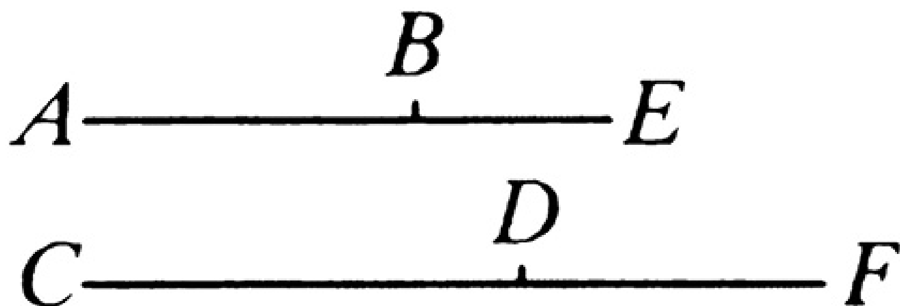
因此：*CD*是中项面有理面差的边。[X. 77]

证完。

命题107

…

与一个两中项面差的边可公度的线段仍是一个两中项面差的边。



设：已知一个两中项面差的边*AB*，而*CD*与*AB*是可公度的。

那么可以说：*CD*也是一个两中项面差的边。

设：*BE*是*AB*上的附加线段，同上作图，

那么：*AE*、*EB*是正方不可公度的，并且它们上的正方形的和是中项面，由它们围成的矩形是中项面，并且有它们上的正方形的和与由它们围成的矩形是不可公度的。[X. 78]

同理可证：*AE*、*EB*分别与*CF*、*FD*是可公度的，并且*AE*、*EB*上的正方形的和与*CF*、*FD*上的正方形的和是可公度的，而矩形*AE*、*EB*与矩形*CF*、*FD*是可公度的。

因此：*CF*、*FD*也是正方不可公度的，

并且它们上的正方形的和是中项面，由它们围成的矩形是中项面，

并且它们上的正方形的和与由它们围成的矩形是不可公度的，

因此：*CD*是一个两中项面差的边。[X. 78]

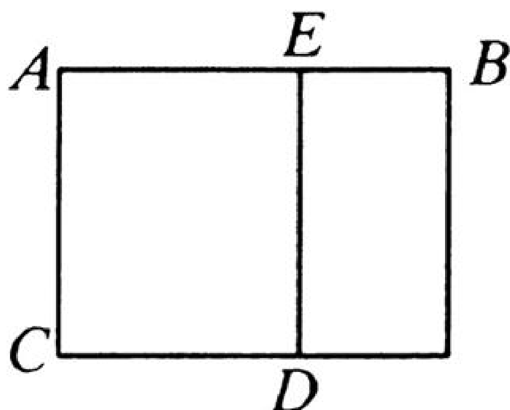
证完。

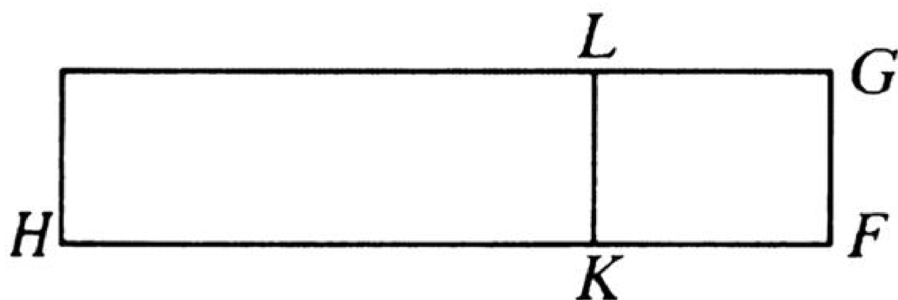
命题108

…

假如从一个有理面减去一个中项面，那么余面的边是二条无理线段之

一，要么是一条余线，要么是一条次线。





设：从有理面*BC*减去一个中项面*BD*。

那么可以说：*EC*的边是二无理线段之一，要么是一条余线，要么是一条次线。

设：在有理线段*FG*上贴合一个矩形*GH*等于*BC*，

作*GK*等于减去的*DB*，余量*EC*等于*LH*。

因为：*BC*是有理面，*BD*是中项面，且*BC*等于*GH*，而*BD*等于*GK*，

因此：*GH*是有理面，而*GK*是中项面。

因为：它们都是贴合于有理线段*FG*上，

所以：*FH*是有理的，并且与*FG*是长度可公度的。[X. 20]

因为：*FK*是有理的，并且与*FG*是长度不可公度的，[X. 22]

因此：FH与FK是长度不可公度的，[X. 13]

所以：FH、FK是仅正方可公度的有理线段，

因此：KH是一条余线[X. 73]，KF是它上的附加线段。

因为：HF上的正方形比FK上的正方形大一个与HF可公度，或者是不可公度线段上的正方形的情况，

先设：HF上的正方形比FK上的正方形大一个与它可公度线段上的正方形。

因为：全线段HF与所给定的有理线段FG是长度可公度的，

因此：KH是一个第一余线。[X. 定义III. 1]

因为：与一个由有理线段和一个第一余线围成的矩形的边是一条余线，[X. 91]

所以：LH的边，也就是EC的边是一条余线。

又设：HF上的正方形比FK上的正方形大一个与HF是不可公度线段上的正方形。

因为：全线段FH与所给定的有理线段FG是长度可公度的，

因此：KH是一个第四余线，[X. 定义III. 4]

所以：与一个由有理线段和一个第四余线围成的矩形的边是一个次线。[X. 94]

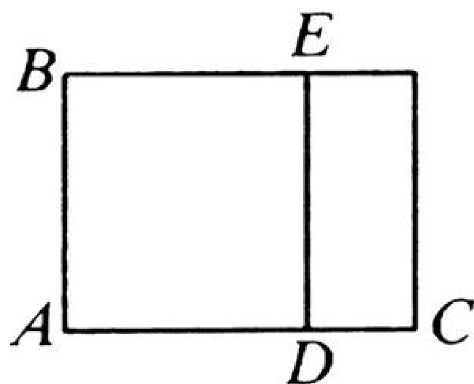
证完。

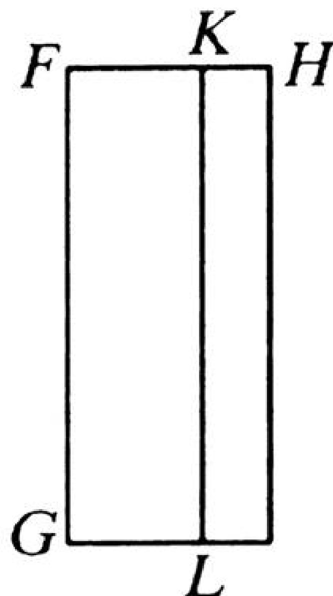
命题109

…

假如从一个中项面减去一个有理面，那么余面的边是二无理线段之一，

要么是一个第一中项余线，要么是一个中项面有理面差的边。





设：从中项面*BC*减去有理面*BD*。

那么可以说：余面*EC*的边是两个无理线段之一，要么是一个中项线的第一余线，要么是一个中项面有理面差的边。

设：已知有理线段*FG*，令各面类似地贴合上去，

那么：*FH*是有理的，并且与*FG*是长度不可公度的。

又因：*KF*是有理的，并且与*FG*是长度可公度的，

所以：*FH*、*FK*是仅正方可公度的两条有理线段，[X. 13]

因此：*KH*是一条余线，而*FK*是它上的附加线段。[X. 73]

因为：倘若*HF*上的正方形比*FK*上的正方形大一个要么与*HF*是可公度的线段上的正方形，要么与*HF*是不可公度的线段上的正方形，

先设：*HF*上的正方形比*FK*上的正方形大一个与*HF*是可公度的线段上的正方形，

那么：附加线段FK与所给定的有理线段FG是长度可公度的，

因此：KH是一个第二余线。[X. 定义III. 2]

又因：FG是有理的，

所以：LH的边，也就是EC的边是一个中项线的第一余线。[X. 92]

又设：HF上的正方形比FK上的正方形大一个与HF不可公度的线段上的正方形，

因为：附加线段FK与所给定的有理线段FG是长度可公度的，

那么：HK是一个第五余线，[X. 定义III. 5]

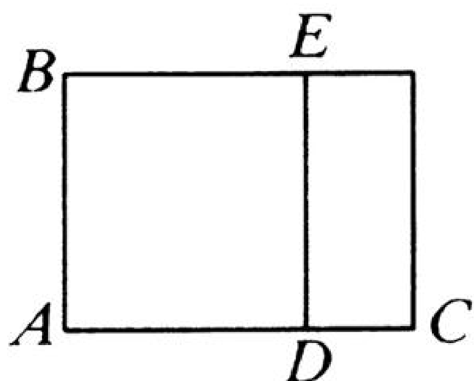
因此：EC的边是一个中项面有理面差的边。[X. 95]

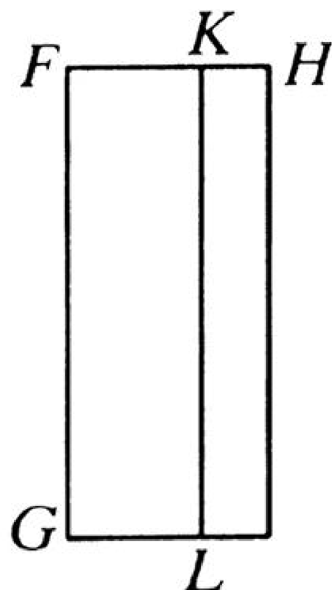
证完。

命题110

…

假如从一个中项面减去一个与此面不可公度的中项面，那么与余面的边是二无理线段之一，要么是一个中项线的第二余线，要么是一个两中项面差的边。





同前作图。

设：从中项面*BC*减去一个与*BC*不可公度的中项面*BD*。

那么可以说：*EC*的边是两无理线段之一，要么是第二中项余线，要么是一个两中项面差的边。

因为：矩形*BC*和矩形*BD*都是中项面，并且*BC*与*BD*是不可公度的，

因此：线段*FH*、*FK*每一个都是有理的，并且与*FG*是长度不可公度的。[X. 22]

因为：*BC*与*BD*是不可公度的，也就是*GH*与*GK*是不可公度的，

所以：*HF*与*FK*也是不可公度的，[VI. 1，X. 11]

所以：*FH*、*FK*是仅正方可公度的两有理线段，

因此：*KH*是一条余线。[X. 73]

先设：*FH*上的正方形比*FK*上的正方形大一个与*FH*可公度的线段上的正方形，

线段*FH*、*FK*的每一个与所给定的有理线段*FG*不是长度可公度的，

那么：*KH*是一个第三余线。[X. 定义III. 3]

因为：*KL*是一条有理线段，由一条有理线段和一个第三余线围成的矩形是无理的，

那么：它的边是无理的，即一个所谓的中项线的第二余线，[X. 93]

所以：*LH*的边，也就是*EC*的边是一个中项线的第二余线。

又设：*FH*上的正方形比*FK*上的正方形大一个与*FH*是不可公度的线段上的正方形，

且线段*HF*、*FK*的每一个与*FG*不是长度可公度的，

那么：*KH*是一个第六余线。[X. 定义III. 6]

因为：由一条有理线段和一个第六余线围成的矩形的边是一个两中项面差的边，[X. 96]

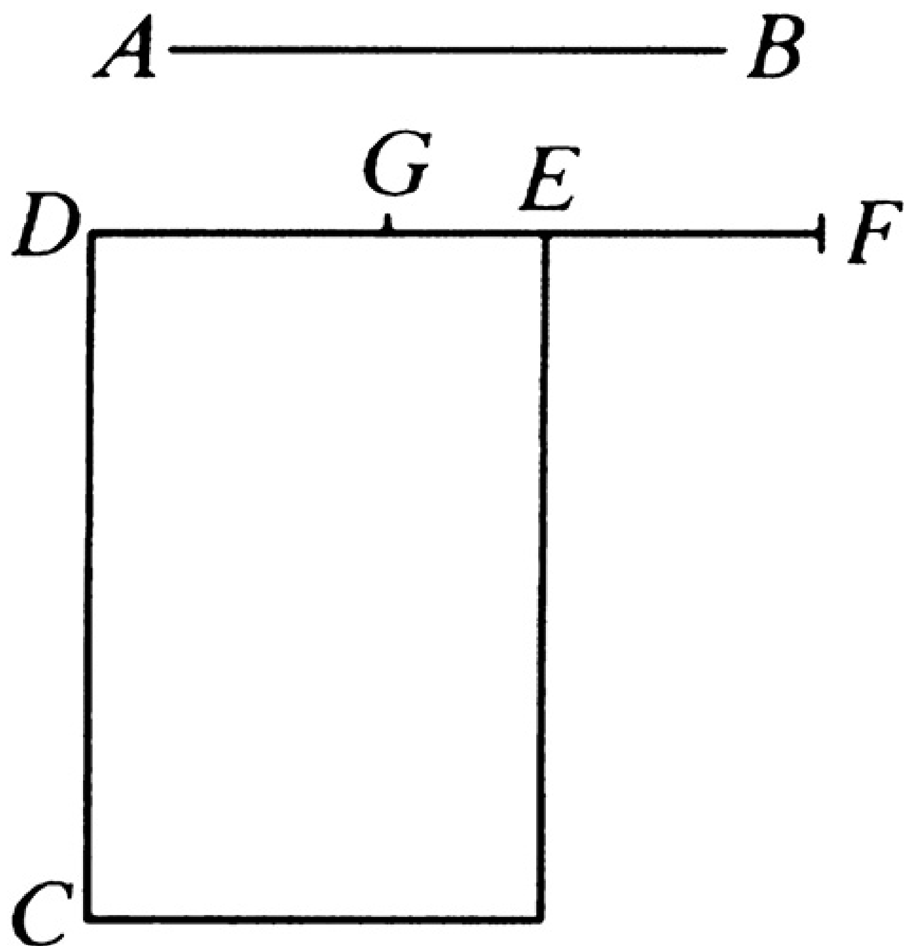
因此：与*LH*，也就是*EC*的边是一个两中项面差的边。

证完。

命题111

…

余线与二项线是不同类的。



设：*AB*是一条余线。

那么可以说：*AB*与二项线是不同类的。

先设：是同类的，

那么：已知*DC*是一条有理线段，并对*DC*贴合一矩形*CE*等于*AB*上的正方形，产生出作为宽的*DE*。

因为：*AB*是一条余线，

因此：*DE*是一个第一余线。[X. 97]

设：*EF*是对*DE*的附加线段，

因此：DF、FE是仅正方可公度的有理线段，并且DF上的正方形比FE上的正方形大一个与DF是可公度的线段上的正方形，并且DF与给定的有理线段DC是长度可公度的。[X. 定义III. 1]

又根据设：AB是第二项线，

所以：DE是一个第一二项线。[X. 60]

再设：DE在点G被分为它的两段，其中DG是大段，

因此：DG、GE是仅正方可公度的两条有理线段，

并且DG上的正方形比GE上的正方形大一个与DG是可公度的线段上的正方形，

而大段DG与所给定的有理线段DC是长度可公度的，[X. 定义II. 1]

因此：DF与DG是长度可公度的，[X. 12]

所以：余量GF与DF也是长度可公度的。[X. 15]

因为：DF与EF是长度不可公度的，

因此：FG与EF也是长度不可公度的，[X. 13]

所以：GF、FE是仅正方可公度的有理线段，

因此：EG是一条余线。[X. 73]

又因：EG也是有理的，

这是不符合实际的，

所以：余线与二项线是不同类的。

证完。

余线以及它以后的无理线段既不同于中项线，也彼此不相同。

倘若在一条有理线段上贴合一与中项线上的正方形相等的矩形，那么产生的作为宽的线段是有理的，

并且与原有理线段是长度不可公度的。[X. 22]

倘若在一条有理线段上贴合出一个矩形等于余线上的正方形，那么产生的作为宽的线段为第一余线。[X. 97]

在一条有理线段上贴合出一个矩形，等于中项线的第一余线上的正方形，那么产生的宽是第二余线。[X. 98]

在一条有理线段上贴合出一个矩形，等于中项线的第二余线上的正方形，那么产生的宽是第三余线。[X. 99]

在一条有理线段上贴合出一个矩形，等于次线上的正方形相等的矩形，那么产生的宽为第四余线。[X. 100]

在一条有理线段上贴合出一个矩形，等于中项面有理面差的边上的正方形，那么产生的宽为第五余线。[X. 101]

在一条有理线段上贴合出一个矩形，等于两中项面差的边的正方形，那么产生的宽为第六余线。[X. 102]

因为：上面说到的宽与第一条线段不同，并且彼此不同，与第一个直线不同是因为它是有理的，彼此不同是因为它们不同级。

所以：显然，这些无理线段本身也互不相同。

又因，已经证明：余线与二项线是不同类的。[X. 111]

但如果在有理线段上贴合出一个矩形，等于余线以后的线段上的正方形，那么产生的宽依次为相应级的余线，

同理：在有理线段上贴合出一个矩形，等于二项线以后的线段上的

正方形，那么产生的宽依次为相应级的二项线。

所以：这样的余线以后的无理线段不同，二项线以后的无理线段也不同。

因此：共有十三类无理线段，分别是：

中项线，

二项线，

第一双中项线，

第二双中项线，

主线，

中项面有理面和的边，

两中项面和的边，

余线，

第一中项余线，

第二中项余线，

次线，

中项面有理面差的边，

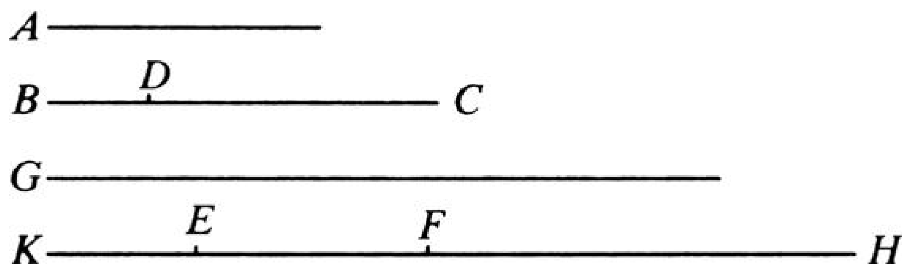
两中项面差的边。

命题112

…

在二项线上贴合一矩形等于一条有理线段上的正方形，那么产生作为宽的线段是一条余线，这条余线的两段与二项线的两段是可公度的，并且

有同比，并且余线与二项线有相同的等级。



设：已知一条有理线段*A*，一个二项线*BC*，而*DC*是它的大段，矩形*BC*、*EF*等于*A*上的正方形。

那么可以说：*EF*是一条余线，它的两段与*CD*、*DB*是可公度的，并且有相同的比，且*EF*与*BC*有相同的等级。

设：矩形*BD*、*G*等于*A*上的正方形。

因为：矩形*BC*、*EF*等于矩形*BD*、*G*，

因此：*CD*比*BD*如同*G*比*EF*。[VI. 16]

又因：*CB*大于*BD*，

所以：*G*大于*EF*。[V. 16，V. 14]

设：*EH*等于*G*，

因此：*CB*比*BD*如同*HE*比*EF*，

所以，由分比：*CD*比*BD*如同*HF*比*FE*。[V. 17]

设作出比例：*HF*比*EF*如同*FK*比*KE*，

因此：整体*HK*比整体*KF*如同*FK*比*KE*。

因为：前项之一比后项之一如同所有前项和比所有后项和，[V. 12]

又因：*FK*比*KE*如同*CD*比*DB*，[V. 11]

因此：*HK*比*KF*如同*CD*比*DB*。[V. 11]

因为：*CD*上的正方形与*DB*上的正方形是可公度的，[X. 36]

所以：*HK*上的正方形与*KF*上的正方形是可公度的。[VI. 22，X. 11]

因为：三条线段*HK*、*KF*、*KE*是成比例的，[V. 定义9]

所以：*HK*上的正方形比*KF*上的正方形如同*KH*比*KE*，

因此：*HK*与*KE*是长度可公度的，

所以：*HE*与*EK*也是长度可公度的。[X. 15]

因为：*A*上的正方形等于矩形*EH*、*BD*，且*A*上的正方形是有理的，

因此：矩形*EH*、*BD*也是有理的。

又因：它是贴合在有理线段*BD*上的矩形，

所以：*EH*是有理的，并且与*BD*是长度可公度的，[X. 20]

因此：与*EH*是可公度的*EK*也是有理的，并且与*BD*是长度可公度的。

因为：*CD*比*DB*如同*FK*比*KE*，

CD、*DB*是仅正方可公度的两线段，

因此：*FK*、*KE*也是仅正方可公度的。[X. 11]

因为：*KE*是有理的，

那么：*FK*也是有理的，

因此：*FK*、*KE*是仅正方可公度的两有理线段，

所以：*EF*是一条余线。[X. 73]

因为：*CD*上的正方形比*DB*上的正方形大一个要么与*CD*是可公度的

线段上的正方形，要么与CD是不可公度的线段上的正方形，

倘若CD上的正方形比DB上的正方形大一个与CD是可公度的线段上的正方形，

那么：FK上的正方形比KE上的正方形大一个与FK是可公度的线段上的正方形。[X. 14]

倘若CD与所给定的有理线段是长度可公度的，

那么：FK与所给定的有理线段也是长度可公度的。[X. 11，12]

倘若BD与所给定的有理线段是可公度的，

那么：KE也是这样。[X. 12]

倘若两线段CD、DB每一个与所给定的有理线段是不可公度的，

那么：两线段FK、KE每一个与所给定的有理线段也不是可公度的。

倘若CD上的正方形比DB上的正方形大一个与CD是不可公度的线段上的正方形，

那么：FK上的正方形比KE上的正方形大一个与FK是不可公度的线段上的正方形。[X. 14]

倘若CD与所给定的有理线段是可公度的，

那么：FK也与所给定的有理线段是可公度。

倘若BD与所给定的有理线段是可公度的，

那么：KE也与所给定的有理线段是可公度的。

倘若两线段CD、DB每一个与所给定的有理线段不是可公度的，

那么：两线段FK、KE与所给定的有理线段也不是可公度的，

因此：FE是一条余线，它的两段FK、KE与二项线的两段CD、DB是

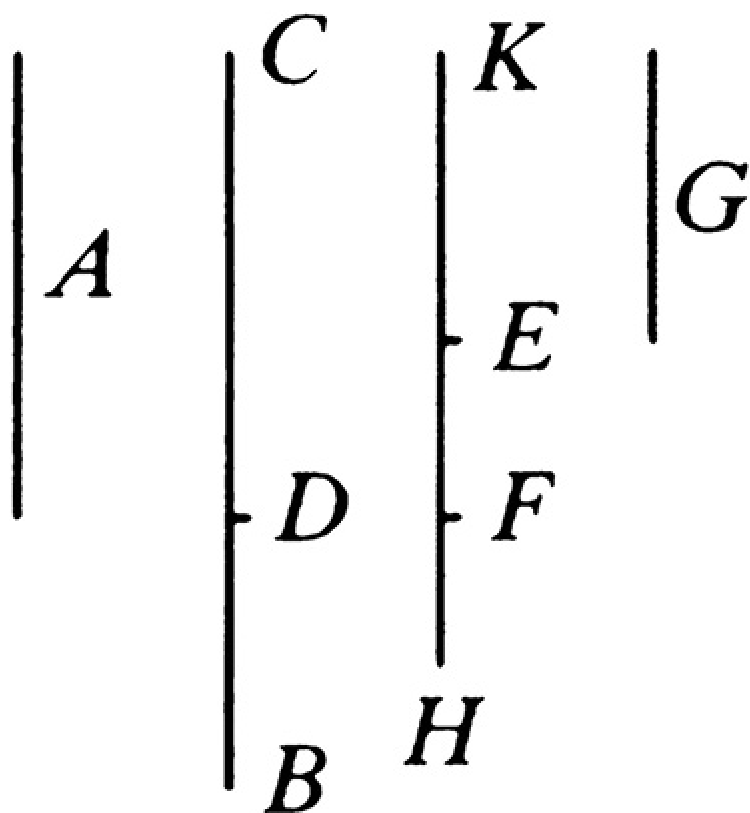
可公度的，它们的比相同，且*EF*与*BC*有相同的等级。

证完。

命题113

…

在余线上贴合一个等于一条有理线段上的正方形的矩形，那么产生作为宽的是一个二项线，并且二项的两段与余线的两段是可公度的，它们的比相同，并且二项线与余线有相同的等级。



设：已知一条有理线段*A*，一条余线*B*，并在*BD*上贴合一个矩形，等于*A*上的正方形，并产生出作为宽的*KH*。

那么可以说：*KH*是一个二项线，它的两段与余线*BD*的两段是可公

度的，并且有相同的比，KH与BD也有相同的等级。

设：DC是对BD的附加线段，

因此：BC、CD是仅正方可公度的两有理线段。[X. 73]

设：矩形BC、G等于A上的正方形。

因为：A上的正方形是有理的，

因此：矩形BC、G是有理的。

又因：它是贴合于有理线段BC上的，

所以：G是有理的且与BC是长度可公度的。[X. 20]

因为：矩形BC、G等于矩形BD、KH，

因此，有比例：CB比BD如同KH比G。[VI. 16]

因为：BC大于BD，

所以：KH大于G。[V. 16，V. 14]

设：KE等于G，

因此：KE与BC是长度可公度的。

因为：CB比BD如同KH比KE，

因此，由换比：BC比CD如同KH比HE。[V. 19，推论]

设作出比例：KH比HE如同HF比FE，

因此：余量KF比FH如同KH比HE，也就是如同BC比CD。[V. 19]

因为：BC、CD是仅正方可公度的，

所以：KF、FH也是仅正方可公度的。[X. 11]

因为：KH比HE如同KF比FH，

KH比HE如同HF比FE，

所以：KF比FH如同FH比FE，[V. 11]

因此：第一个比第三个如同第一个上的正方形比第二个上的正方形，[V. 定义9]

所以：KF比FE如同KF上的正方形比KH上的正方形。

因为：KF、FH是正方可公度的，

所以：KF上的正方形与FH上的正方形是可公度的，

因此：KF与FE也是长度可公度的，[X. 11]

所以：KF与KE也是长度可公度的。[X. 15]

因为：KE是有理的，并且与BC是长度可公度的，

所以：KF也是有理的，并且与BC是长度可公度的。[X. 12]

因为：BC比CD如同KF比FH，

所以，由更比：BC比KF如同DC比FH。[V. 16]

因为：BC与KF是长度可公度的，

因此：FH与CD也是长度可公度的。[X. 11]

因为：BC、CD是仅正方可公度的两有理线段，

所以：KF、FH也是仅正方可公度的两有理线段，

所以：KH是二项线。[X. 36]

倘若BC上的正方形比CD上的正方形大一个与BC是可公度的线段上的正方形，

那么：KF上的正方形比FH上的正方形也大一个与KF是可公度的线段上的正方形。[X. 14]

倘若BC与所给定的有理线段是长度可公度的，

那么：KF与所给定的有理线段也是长度可公度的。

倘若CD与所给定的有理线段是长度可公度的，

那么：FH与所给定的有理线段也是长度可公度的。

倘若两线段BC、CD的每一个与给定的有理线段不是长度可公度的，

那么：两线段KF、FH的每一个与给定的有理线段也不是长度可公度的。

又因：倘若BC上的正方形比CD上的正方形大一个与BC是不可公度的线段上的正方形，

那么：KF上的正方形比FH上的正方形也大一个与KF是不可公度的线段上的正方形。[X. 14]

倘若BC与给定的有理线段是长度可公度的，

那么：KF与给定的有理线段也是长度可公度的。

倘若CD与给定的有理线段是长度可公度的，

那么：FH与给定的有理线段也是长度可公度的。

倘若两线段BC、CD的每一个与所给定的有理线段不是长度可公度的，

那么：两线段KF、FH的每一个与所给定的有理线段也不是长度可公度的，

因此：KH是一个二项线，并且它的两段KF、FH与余线的两段BC、

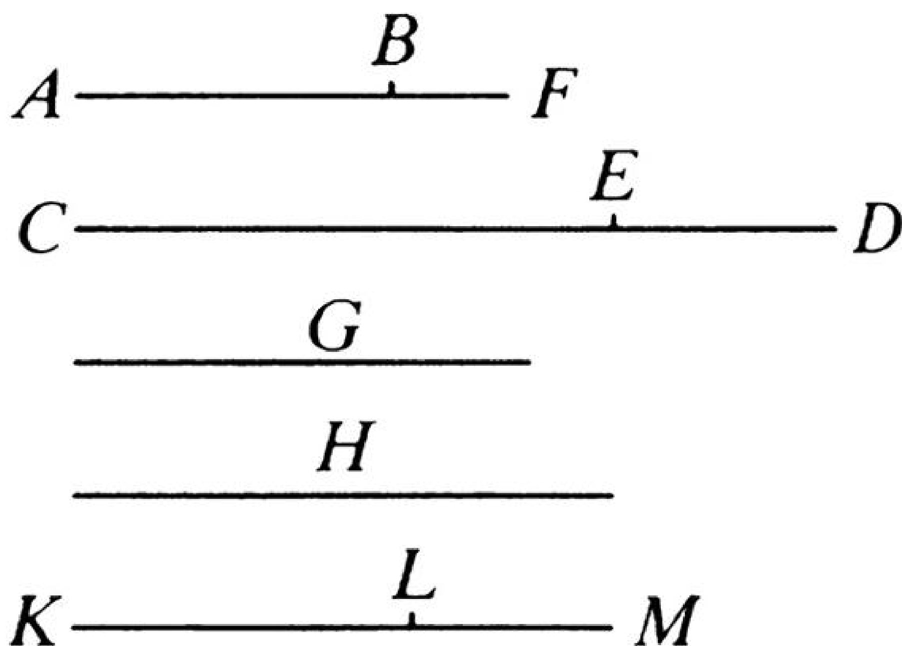
CD是可公度的，它们的比也相同，并且KH与BD有相同的等级。

证完。

命题114

…

假如一条余线和一个二项线围成一个矩形，并且此余线的两段与二项线的两段是可公度的，并且有相同的比，那么这个面的边是一条有理线段。



设：矩形AB、CD由余线AB和二项线CD围成，CE是CD的大段，假设二项线的两段CE、ED与余线的两段AF、FB是可公度的，并且有相同的比，且矩形AB、CD的边是G。

那么可以说：G是有理的。

已知H是一条有理线段，并在CD上贴合一矩形，等于H上的正方形，产生出作为宽的KL，

因此：KL是一条余线。

设：KL的两段KM、ML与二项线CD的两段CE、ED是可公度的，并且它们的比相同。[X. 112]

因为：CE、ED与AF、FB也是可公度的，且它们的比相同，

所以：AF比FB如同KM比ML。

由更比：AF比KM如同BF比LM，

因此：余量AB比余量KL如同AF比KM。[V. 19]

因为：AF与KM是可公度的，[X. 12]

因此：AB与KL也是可公度的。[X. 17]

因为：AB比KL如同矩形CD、AB比矩形CD、KL，[VI. 1]

因此：矩形CD、AB与矩形CD、KL也是可公度的。[X. 11]

因为：矩形CD、KL等于H上的正方形，

所以：矩形CD、AB与H上的正方形是可公度的。

因为：G上的正方形等于矩形CD、AB，

所以：G上的正方形与H上的正方形是可公度的。

因为：H上的正方形是有理的，

因此：G上的正方形也是有理的，

所以：G是有理线段。

又因：它是矩形CD、AB的“边”，

因此：已证明命题。

证完。

推论 由两无理线段围成的矩形也可以是一个有理面。

命题115

…

从一个中项线产生的无穷多个无理线段，没有任何一个与之前的任一无理线段相同。

A

B

C

D

设：已知有一个中项线A。

那么可以说：由A产生的无穷多个无理线段，没有一个与之前的任何一个相同。

已知有理线段B，作一条线段C，使其上的正方形等于矩形B、A，

那么：C是一条无理线段。[X. 定义4]

因为：由无理线段和有理线段围成的矩形是无理的，[X. 20，推论]

又因：它与之前任何一条不相同，因为之前没有任意一条无理线段上的正方形贴合一条有理线段得的矩形，产生出作为宽的线段是中项线，

设：D上的正方形等于矩形B、C，

因此：D上的正方形是无理的，[X. 20，推论]

所以：D是无理的。[X. 定义4]

因为：它与之前任一无理线段不同，

这是因为在有理线段上贴合一等于之前任一无理线段上的正方形的矩形，

由此产生出作为宽的不是C，

同理：假如将这种排列无线继续下去，

那么从一个中项线能产生无穷多个无理线段，

并且没有一个与之前任一无理线段相同。

证完。

卷XI

定义

01 体有长、宽和高。

02 体的边界是面。

03 一直线和一平面内所有与它相交的直线都成直角时，就称这个直线与这个平面成直角。

04 在两个相交平面之一内作直线与它们的交线成直角，并且这些直线也与另一平面成直角时，那么称这两平面相交成直角。

05 从一条和平面相交的直线上任一点向平面作垂线，那么该直线与连接交点和垂直的连线所成的角称为该直线与平面的倾角。

06 从两个相交平面交线上的同一点，分别在两平面内各作交线的垂线，那么这两条垂线所夹的锐角叫作该两平面的倾角。

07 一对平面的倾角等于另外一对平面的倾角时，就称它们有相似的倾角。

08 两平面总不相交，那么称它们是平行平面。

09 凡由个数相等的相似面构成的所有立方图形称为相似立体图形。

10 凡由个数相等的相似且相等的面构成的立体图形，称为相似且相等的立体图形。

11 由不在同一平面内多于两条且交于一点的直线全体构成的图形称为立体角。换句话说，由不在同一平面内且多于两个而又交于一点的平面角所构成的图形称为一个立体角。

12 几个交于一点的面及另外一个面构成的图形，在此面与交点之间的部分称为棱锥。

13 一个棱柱是一个立体图形，它是由一些平面构成的，其中有两个

面是相对且相等，相似且平行的，其他各面都是平行四边形。

14 固定一个半圆的直径，旋转半圆到开始位置，所形成的图形称为一个球。

15 球的轴是半圆绕成球时的不动直径。

16 球心是半圆的圆心。

17 过球心的任意直线被球面从两方截出的线段称为球的直径。

18 固定直角三角形的一条直角边，旋转直角三角形到开始位置，所形成的图形称为圆锥。倘若固定的一直角边等于另一直角边时，那么所形成的圆锥称为直角圆锥；倘若小于另一边，就称为钝角圆锥；倘若大于另一边，就称为锐角圆锥。

19 直角三角形绕成圆锥时，不动的那条直角边称为圆锥的轴。

20 三角形的另一边经旋转后所形成的圆面，称为圆锥的底。

21 固定矩形的一边，绕此边旋转矩形到开始位置，所成的图形称为圆柱。

22 矩形绕成圆柱时的不动边，称为圆柱的轴。

23 矩形绕成圆柱时，相对的两边旋转成的两个圆面叫作圆柱的底。

24 凡圆锥或圆柱其轴与底的直径成比例时，就称这些圆锥或圆柱为相似圆锥或相似圆柱。

25 六个相等的正方形围成的立方图形，称为正立方体。

26 八个全等的等边三角形围成的立体图形，称为正八面体。

27 二十个全等的等边三角形围成的立体图形，称为正二十面体。

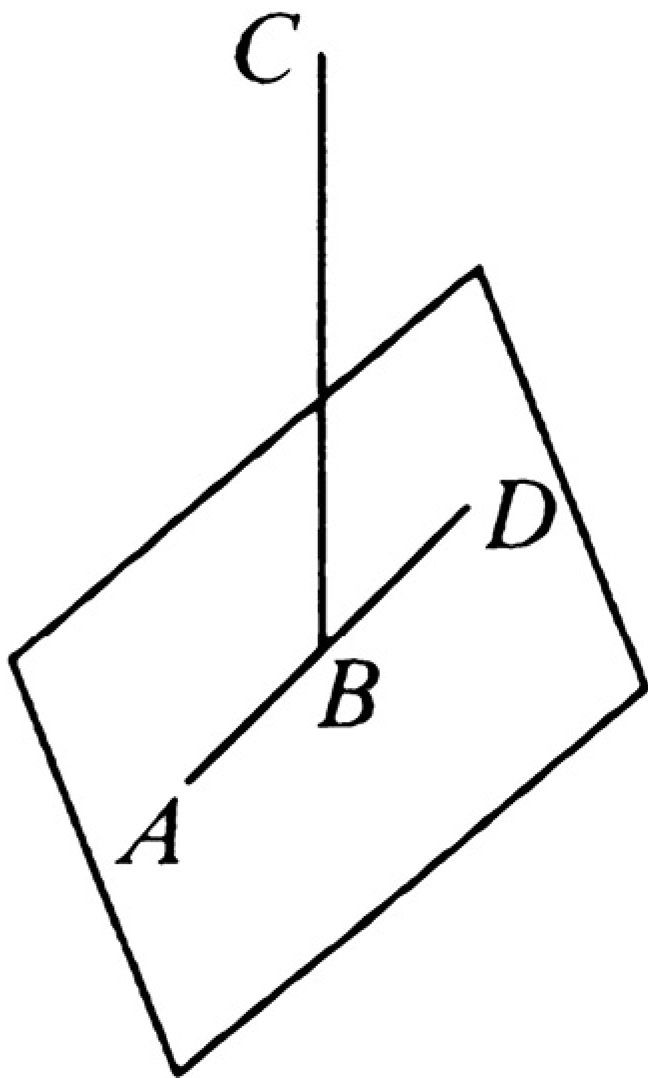
28 十二个相等的等边且等角的五边形围成的立体图形，称为正十二面体。

命题

命题1

…

一条直线不可能一部分在平面内，另一部分在平面外。



设：已知直线ABC，且AB和BC都是ABC的一部分，而AB在平面

内，BC在此平面外。

那么：在这个平面上就有一条直线与AB连接成同一条直线，

设：这条直线是BD。

那么：两条直线ABC、ABD有共同部分AB，

这是不符合实际的。

这是因为，倘若以B为心，以AB为距离画圆，那么直径将截出不相等的圆弧，

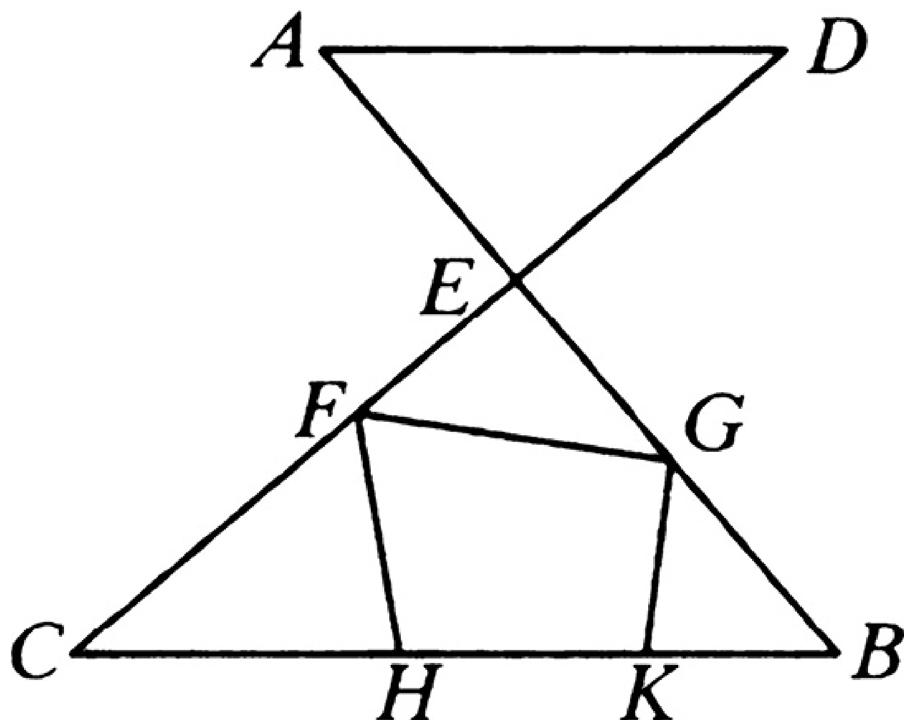
因此：一条直线不可能一部分在平面内，另一部分在平面外。

证完。

命题2

…

假如二条直线彼此相交，那么它们在同一平面内，并且每个三角形也各在同一平面内。



设：两直线*AB*、*CD*交于点*E*。

那么可以说：*AB*、*CD*在同一个平面内，并且每个三角形也在这个平面内。

设：在*EC*、*EB*上分别取得点*F*、*G*。

连接*CB*、*FG*，并引*FH*、*GK*，

先证明：三角形*ECB*在同一个平面内。

倘若三角形*ECB*的一部分*FHC*或*GBK*在一个平面内，而余下的在另一个平面内，

那么：直线*EC*、*EB*之一的一部分在一个平面内，另一部分在另一个平面内。

因为：设三角形*ECB*的一部分*FCBG*在原平面内，其余部分在另一个平面内，

因此：两直线*EC*、*EB*的一部分也在原平面内，另一部分在另一个平面内，

已经证明了这是不合理的，[XI. 1]

所以：三角形*ECB*在一个平面内。

又因：三角形*ECB*所在的平面也是*EC*、*EB*所在的平面，

且*EC*、*EB*所在的平面也是*AB*、*CD*所在的平面，[XI. 1]

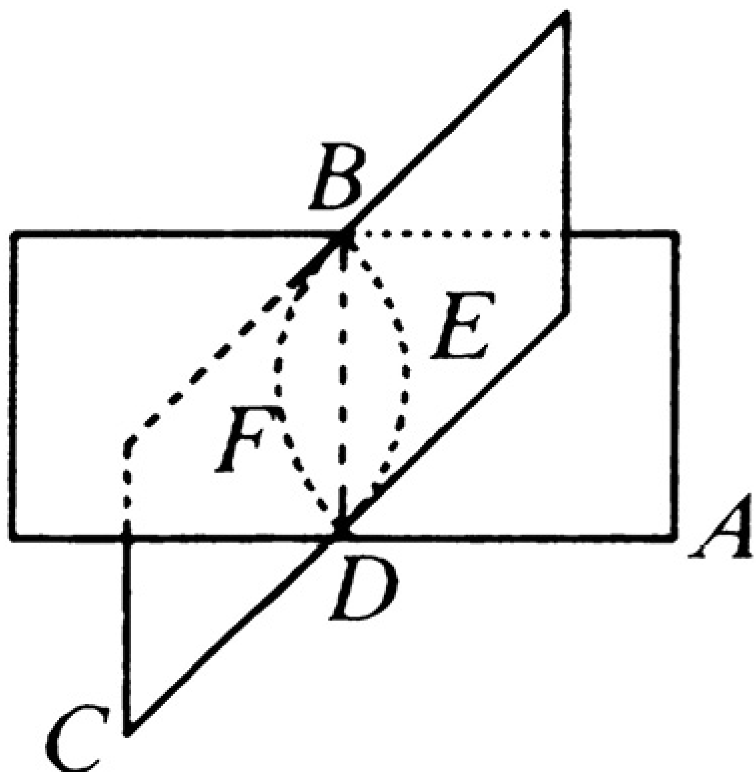
因此：直线*AB*、*CD*在一个平面内，并且每个三角形也在这个平面内。

证完。

命题3

…

假如两个平面相交，那么它们的共同截线是一条直线。



设：两平面*AB*、*BC*相交，*DB*是它们的共同截线。

那么可以说：*DB*是一条直线。

先设：*DB*不是直线，

从*D*到*B*在平面*AB*上连接的直线为*DEB*；在平面*BC*上连接的直线为*DFB*，

因此：两条直线*DEB*、*DFB*有相同的端点，它们围成一个面片，

这是不符合实际的。

因此：*DEB*、*DFB*都不是直线。

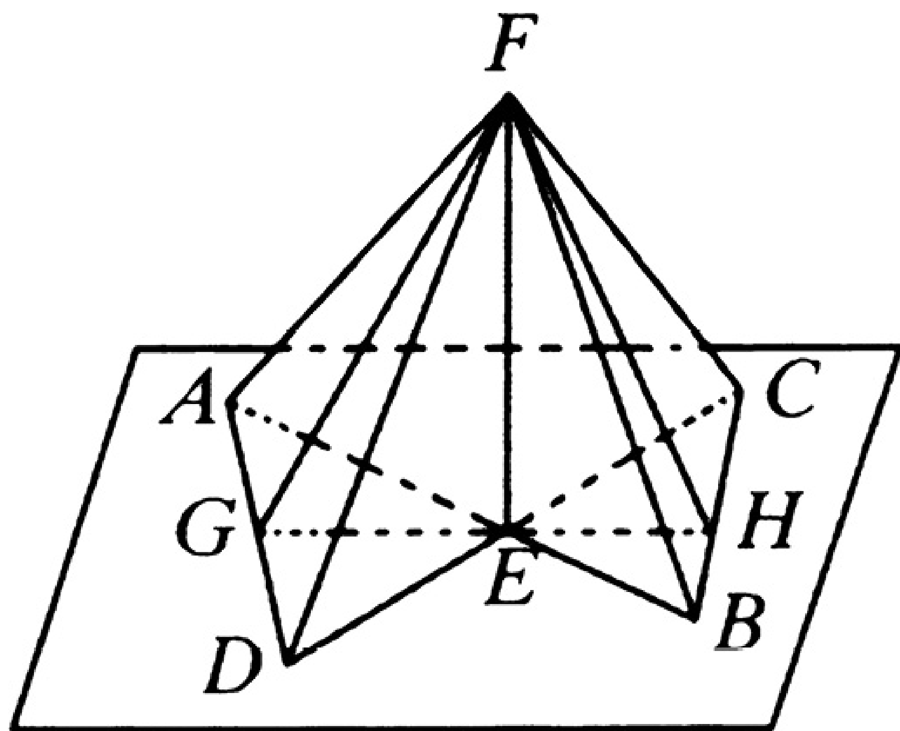
同理可证：除平面*AB*、*BC*的交线之外再没有连接从*D*到*B*的任何其他直线。

证完。

命题4

…

倘若一直线在另两条直线交点处都和它们成直角，那么这条直线与两直线所在平面成直角。



设：已知直线*EF*在二直线*AB*、*CD*的交点*E*与它们成直角。

那么可以说：*EF*也与*AB*、*CD*所在的平面成直角。

设：取*AE*、*EB*、*CE*、*ED*彼此相等，过点*E*任意引一条直线*GEH*。

连接*AD*、*CB*。

在*EF*上任取一点*F*，连接*FA*、*FG*、*FD*、*FC*、*FH*、*FB*。

因为：两线段*AE*、*ED*分别等于线段*CE*、*EB*，并且夹角也相等，[I. 15]

因此：底AD等于底CB，

并且三角形AED等于三角形CEB，[I. 4]

所以：角DAE等于角EBC。

因为：角AEC等于角BEH，[I. 15]

因此：三角形AGE和BEH有两角及夹边AE、EB分别相等，

因此：其余的边也相等，[I. 26]

所以：GE等于EH，且AG等于BH。

因为：AE等于EB，并且FE是两直角处的公共边，

所以：底FA等于底FB。[I. 4]

同理：FC等于FD。

因为：AD等于CB，且FA等于FB，两边FA、AD分别等于两边FB、BC，

又因，已经证明：底FD等于底FC，

因此：角FAD等于角FBC。[I. 8]

又因，已经证明：AG等于BH，且FA等于FB，

两边FA、AG等于两边FB、BH，

因为：角FAG等于角FBH，

因此：底FG等于底FH。[I. 4]

因为已经证明：GE等于EH，

并且EF是公共的，两边GE、EF等于两边HE、EF，

又因：底FG等于底FH，

因此：角*GEF*等于角*HEF*，[I. 8]

所以：角*GEF*、*HEF*都是直角，

因此：*FE*过*E*和直线*GH*成直角。

同理可证：*FE*和已知平面上与它相交的所有直线都成直角。

因为：当一直线和一平面上相交的所有直线都成直角时，那么这条直线与这个平面成直角，[XI. 定义3]

因此：*FE*与平面成直角，

又因：平面经过直线*AB*、*CD*，

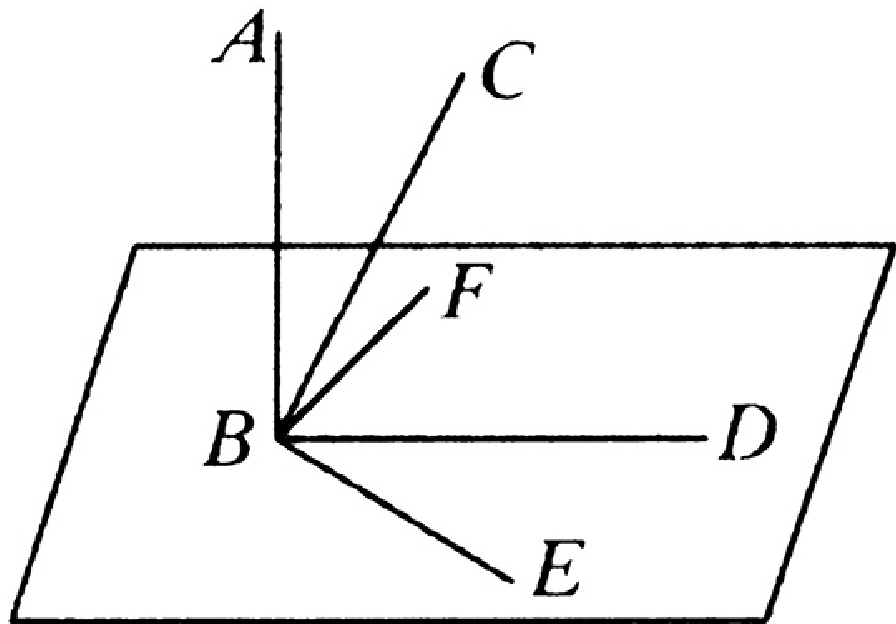
所以：*FE*和经过*AB*、*CD*的平面成直角。

证完。

命题5

…

倘若一直线过三直线的交点且与三直线交成直角，那么此三直线在同一平面内。



设：直线*AB*过三直线*BC*、*BD*、*BE*的交点*B*，并且与它们成直角。

那么可以说：*BC*、*BD*、*BE*在同一个平面内。

设：它们不在同一平面内，

若可能，就设：*BD*、*BE*在同一平面内，

*BC*不在该平面内，过*AB*和*BC*作一平面，它与原平面有一条交线。[XI. 3]

设：它是*BF*，

那么：三直线*AB*、*BC*、*BF*在同一平面内，也就是经过*AB*、*BC*的平面。

因为：*AB*和直线*BD*、*BE*的每一条都成直角，

那么：*AB*也和*BD*、*BE*所在的平面成直角。[XI. 4]

因为：通过*BD*、*BE*的平面是原平面，

因此：*AB*和原平面成直角，

所以：*AB*也和原平面内过*B*点的所有直线成直角。[XI. 定义3]

因为：在原平面内的*BF*与*AB*相交，

因此：角*ABF*是直角，

已知：角*ABC*是直角。

因此：角*ABF*等于角*ABC*，并且它们在一个平面内，

这是不符合实际的，

那么：直线*BC*不在平面外，

因此：三直线*BC*、*BD*、*BE*在同一平面内，

所以：假如一直线过三直线的交点且与三直线交成直角，

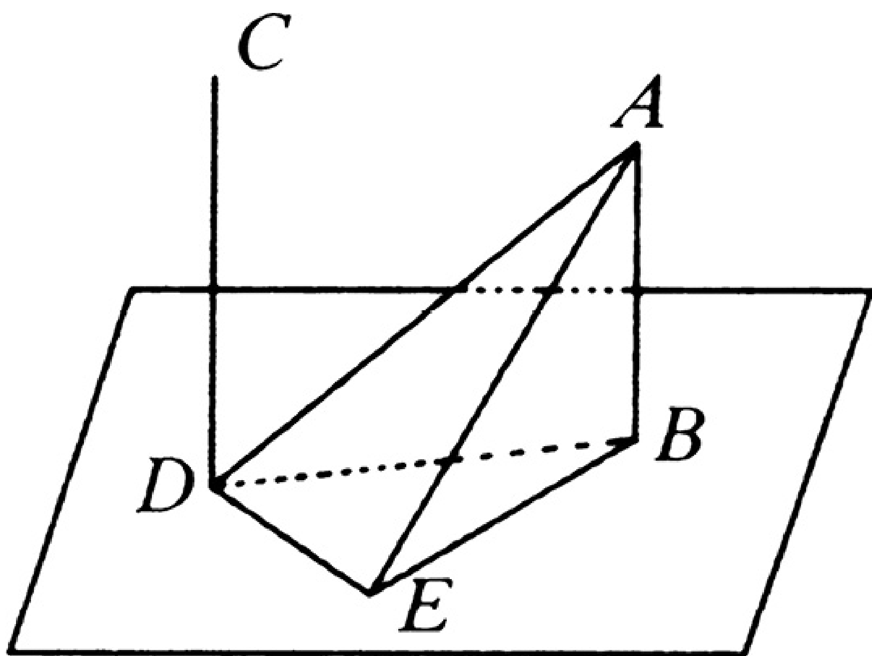
那么这三直线在同一平面内。

证完。

命题6

…

假如两直线和同一平面成直角，那么二直线平行。



设：两条直线*AB*、*CD*都和已知平面成直角。

那么可以说：*AB*平行于*CD*。

设：它们交已知平面于点*B*、*D*，

连接*B*、*D*，

在已知平面内作*DE*和*BD*成直角，又取*DE*等于*AB*，连接*BE*、*AE*及*AD*。

因为：*AB*和已知平面成直角，它也和该平面内与此直线相交的一切直线成直角，[XI. 定义3]

又已知：平面内两直线*BD*、*BE*都和*AB*相交，

因此：角*ABD*和*ABE*都是直角。

同理：角*CDB*、*CDE*也都是直角。

因为：*AB*等于*DE*，并且*BD*是公共的，

所以：两边AB、BD等于两边ED、DB，并且它们各自交成直角，

因此：底AD等于底BE。[I. 4]

因为：AB等于DE，而AD等于BE，两边AB、BE等于两边ED、DA，并且AE为公共底，

因此：角ABE等于角EDA。[I. 8]

因为：角ABE是直角，

因此：角EDA也是直角，

所以：ED和DA成直角。

又因：它也和直线BD、DC的每一条都成直角，

因此：ED和三直线BD、DA、DC在它们的交点处成直角，

所以：三直线BD、DA、DC在同一平面内。[XI. 5]

因为：不论DB、DA在哪个平面内，AB也在这个平面内，又因任意三角形都在一个平面内，[XI. 2]

因此：直线AB、BD、DC在一个平面内。

又因：角ABD、BDC都是直角，

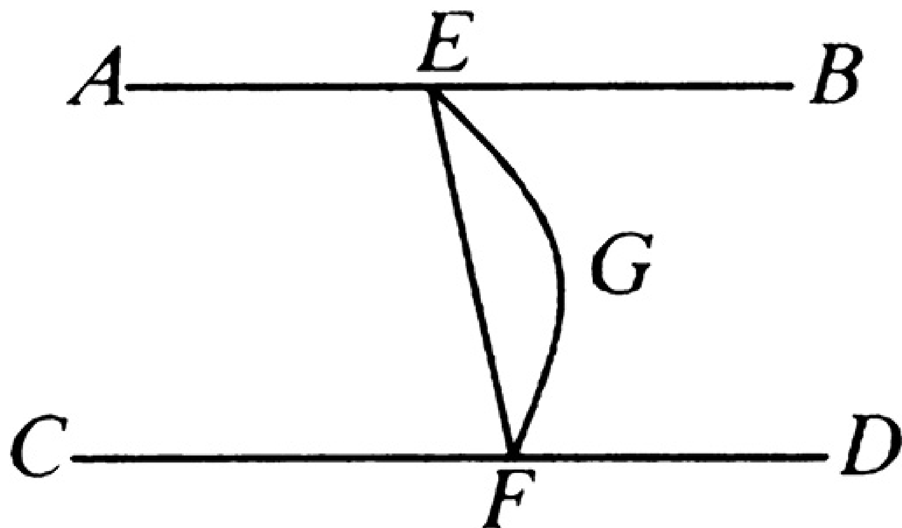
所以：AB平行于CD。[I. 28]

证完。

命题7

…

倘若两条直线平行，那么在这两直线上各任意取一点，那么连接两点的直线和两条平行线在同一平面内。



设：*AB*、*CD*是两条平行直线，分别在每条上各取一点*E*、*F*。

那么可以说：连接点*E*、*F*的直线与两条平行直线在同一平面内。

设：不在一个平面如果是可行的，那么两点*E*、*F*的连线*EGF*在平面外。

过*EGF*作一平面，与二平行直线所在的平面相交于一条直线，[XI. 3]

设：它是*EF*，

因此：两条直线*EGF*、*EF*围成一个面片，

这是不符合实际的，

所以：从*E*到*F*连接的直线不在平面外，

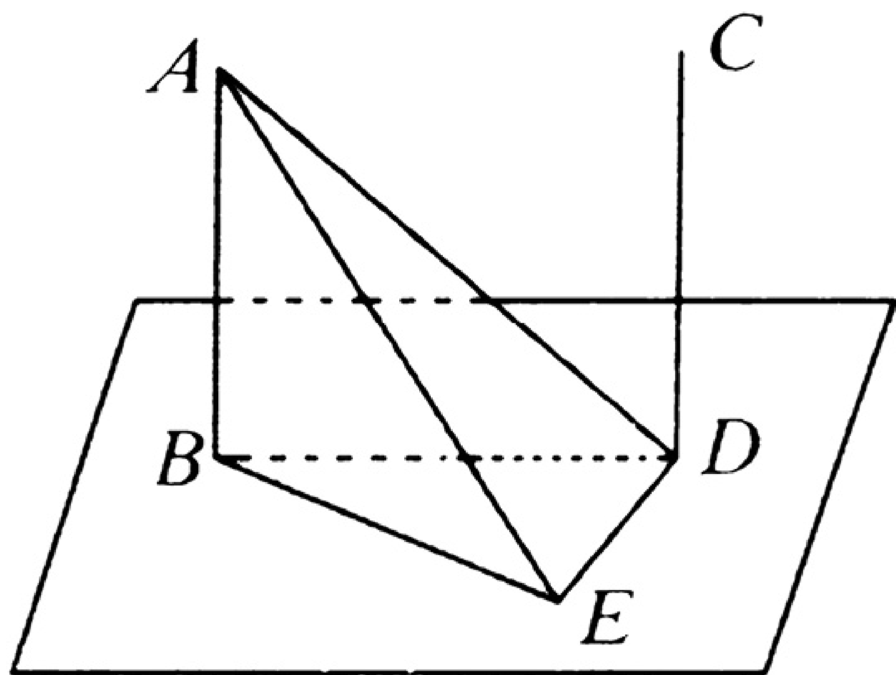
因此：从*E*到*F*连接的直线在两平行线*AB*、*CD*所在的平面内。

证完。

命题8

…

假如两条直线平行，其中一条和一个平面成直角，那么另一条也和这个平面成直角。



设：已知*AB*、*CD*是两条平行线，并且它们之一*AB*与已知平面成直角。

那么可以说：另一条直线*CD*也与同一平面成直角。

设：*AB*、*CD*与已知平面相交于点*B*、*D*，

连接*B*、*D*，

因此：*AB*、*CD*、*BD*在一个平面内。[XI. 7]

设：在已知平面上作*DE*和*BD*成直角，并且取*DE*等于*AB*。

连接*BE*、*AE*、*AD*。

因为：*AB*和已知平面成直角，

因此：*AB*和平面上与它相交的一切直线成直角，[XI. 定义3]

所以：角ABD、ABE都是直角。

因为：直线BD和平行线AB、CD相交，

所以：角ABD、CDB的和等于两直角。[I. 29]

又因：角ABD是直角，

因此：角CDB也是直角，

所以：CD和BD成直角。

因为：AB等于DE，并且BD是公共的，

所以：两边AB、BD等于两边ED、DB。

因为：角ABD和角EDB都是直角，

所以：它们相等，

因此：底AD等于底BE。

因为：AB等于DE，且BE等于AD，

所以：两边AB、BE分别等于两边ED、DA。

又因：AE是公共的底，

所以：角ABE等于角EDA。

因为：角ABE是直角，

所以：角EDA也是直角，

因此：ED和AD成直角。

因为：它与DB成直角，

因此：ED也和经过BD、DA的平面成直角，[XI. 4]

所以：*ED*也和经过*BD*、*DA*的平面内与它相交的直线都成直角。

又因：*DC*在*BD*、*DA*经过的平面内，这是因为*AB*、*BD*在*BD*、*DA*经过的平面内，[XI. 2]

且*DC*也在*AB*、*BD*经过的平面内，

因此：*ED*和*DC*成直角，也就是*CD*和*DE*成直角。

因为：*CD*也和*BD*成直角，

那么：*CD*在两条直线*DE*、*DB*交点*D*处和二直线成直角，

也就是*CD*也与过*DE*、*DB*的平面成直角。[XI. 4]

又因：通过*DE*、*DB*的平面就是所讨论的平面，

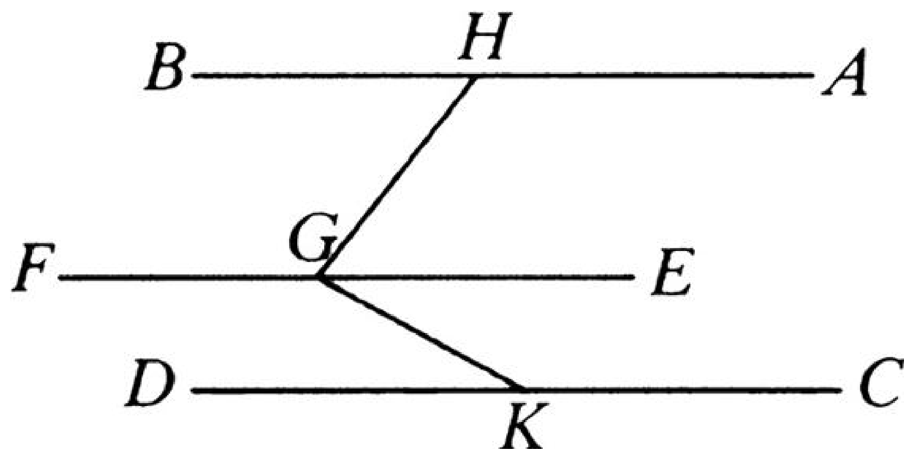
因此：*CD*和已知平面成直角。

证完。

命题9

…

两条直线平行于和它们不共面的同一直线时，这两条直线平行。



设：两条直线AB、CD都平行于和它们不共面的直线EF。

那么可以说：AB平行于CD。

在EF上任取一点G，由它在EF、AB所在的平面内作GH与EF成直角，

在EF、CD所在的平面内作GK与EF成直角。

因为：EF和直线GH、GK的每一条都成直角，

因此：EF也和经过GH、GK的平面成直角。[XI. 4]

因为：EF平行于AB，

所以：AB也和经过HG、GK的平面成直角。[XI. 8]

同理：CD也和经过HG、GK的平面成直角，

因此：直线AB、CD都和经过HG、GK的平面成直角。

又因：假如两条直线都和同一平面垂直，那么它们平行，[XI. 6]

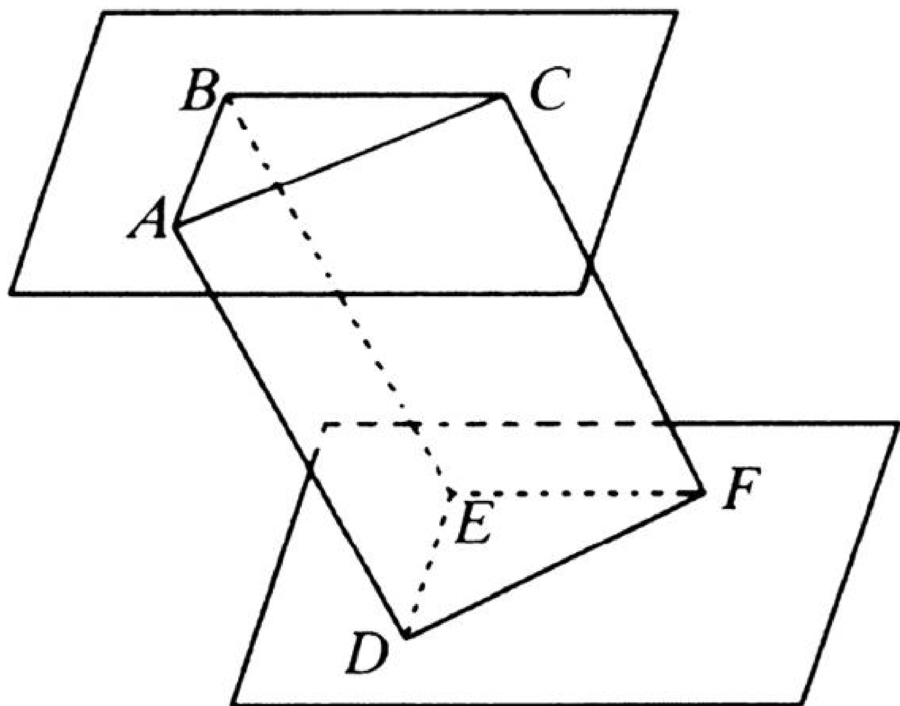
因此：AB平行CD。

证完。

命题10

…

倘若相交的两条直线平行于不在同一平面内两条相交的直线，那么它们的夹角相等。



设：两条直线*AB*、*BC*相交，并且平行于不在同一平面内相交的两直线*DE*、*EF*。

那么可以说：角*ABC*等于角*DEF*。

设：截取*BA*、*BC*、*ED*、*EF*彼此相等，又连接*AD*、*CF*、*BE*、*AC*、*DF*。

因为：*BA*等于且平行于*ED*，

所以：*AD*等于且平行于*BE*，[I. 33]

同理：*CF*等于且平行于*BE*，

所以：两直线*AD*、*CF*都等于且平行于*BE*。

又因：两直线平行于和它们不共面的一直线，那么两直线平行，[XI. 9]

因此：*AD*平行且等于*CF*。

因为：*AC*、*DF*连接着它们，

所以：*AC*等于且平行于*DF*。[I. 33]

因为：两边*AB*、*BC*等于两边*DE*、*EF*，

又因：底*AC*等于底*DF*，

因此：角*ABC*等于角*DEF*。[I. 8]

证完。

命题11

…

从平面外一个给定的点作一直线垂直于已知平面。

设：*A*是平面外一给定的点，并且已知有一平面。

要求：从点A作一直线垂直于已知平面。

设：BC是在已知平面内任意作的一条直线，从A作直线AD垂直于BC。[I. 12]

设：AD也垂直于已知平面。

那么：所求的直线已经作出。

设：倘若不是这样，从点D在已知平面内作DE和BC成直角。[I. 11]

从A作AF垂直于DE。[I. 12]

过点F作GH平行于BC。[I. 31]

因为：BC和直线DA、DE都成直角，

因此：BC也和经过ED、DA的平面成直角。[XI. 4]

因为：GH平行于它，

并且倘若两平行线之一和某一平面成直角，

那么另一直线也和同一平面成直角，[XI. 8]

因此：GH也和经过ED、DA的平面成直角，

所以：GH也和经过ED、DA的平面内和GH相交的一切直线成直角。[XI. 定义3]

因为：AF在ED、DA所在的平面内且和GH相交，

因此：GH和FA成直角。

因为：AF也和DE成直角，

所以：AF和直线GH、DE都成直角。

又因：假如一条直线在两条直线交点处和这两条直线成直角，那么它也和经过两条直线的平面成直角，[XI. 4]

所以：*FA*和经过*ED*、*GH*的平面成直角。

因为：经过*ED*、*GH*的平面就是已知平面，

因此：*AF*和已知平面成直角，

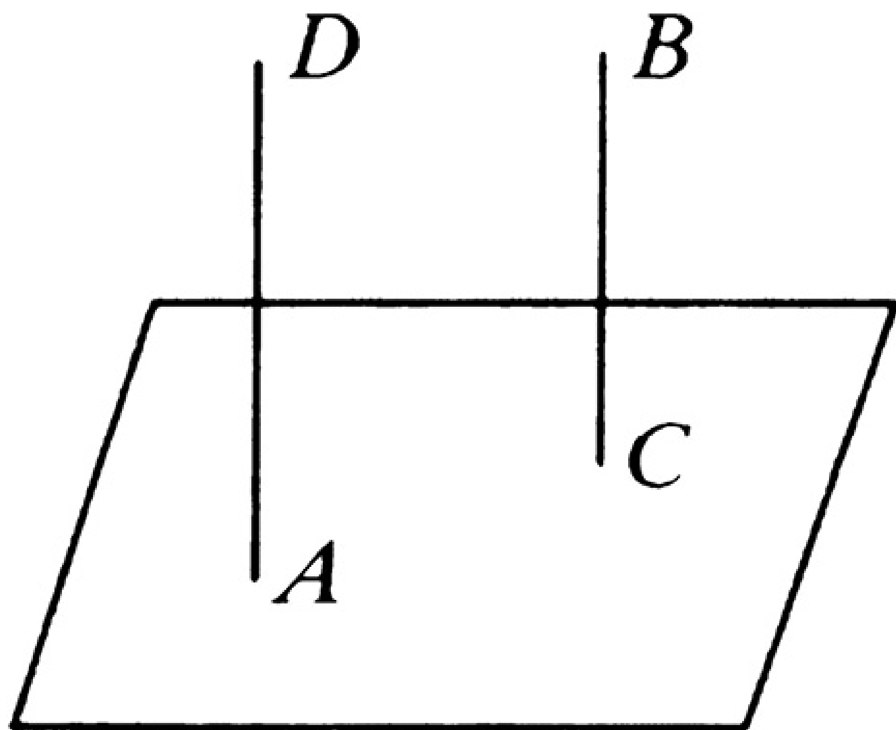
所以：由平面外已知点作了直线*AF*垂直于已知平面。

作完。

命题12

…

在所给定的平面内的已知点作一直线和该平面成直角。



设：已知平面和它上面的点*A*。

要求：由点*A*作一直线和它成直角。

设：在平面外任取一点B，从点B作BC垂直于已知平面。[XI. 11]

过A作AD平行于BC。[I. 31]

因为：AD、CB是两条平行线，它们中的一条BC和该平面成直角，那么其余的一条AD也与已知平面成直角，

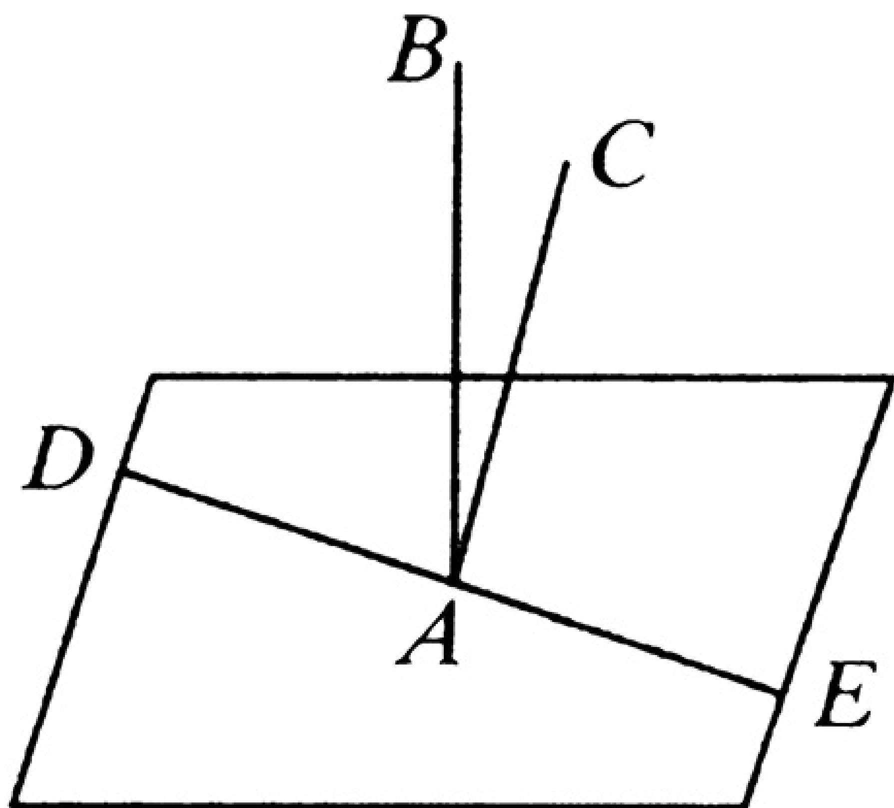
因此：在所给定平面内一点A作了直线AD与该平面成直角。

作完。

命题13

…

从平面内同一点在平面同侧，不可能作两条直线都和这个平面垂直。



如果可能，从平面内找一点A，在平面同侧作出两条直线AB、AC，和这平面垂直。

过BA、AC作一平面，

平面经过点A与已知平面交于一直线DAE，[XI. 3]

因此：直线AB、AC、DAE在同一平面上。

因为：CA和已知平面成直角，

那么和已知平面内和它相交的所有直线成直角，[XI. 定义3]

又因：DAE和CA相交，且角DAE在已知平面内，

因此：角CAE是直角。

同理：角BAE也是直角，

所以：角CAE等于角BAE。

又因：它们在同一平面内，

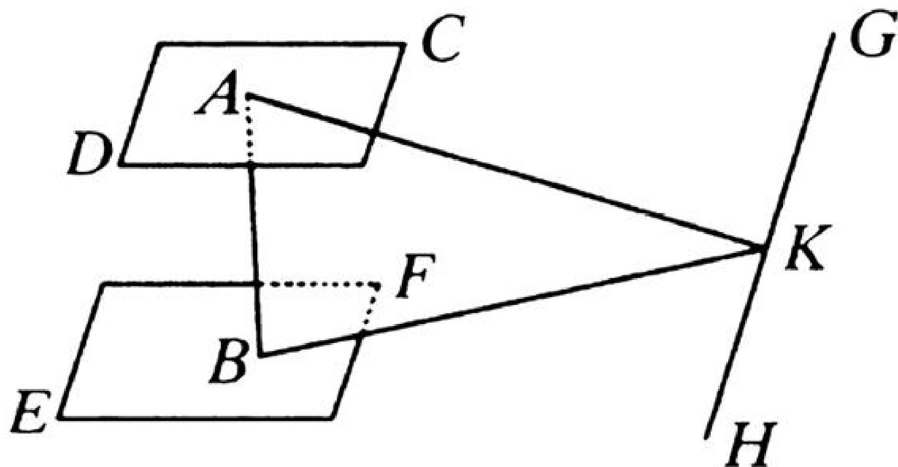
这是不符合实际的。

证完。

命题14

…

和同一直线成直角的两个平面是平行的。



设：一直线*AB*和平面*CD*、*EF*都成直角。

那么可以说：这两个平面是平行的。

倘若它们不平行，延长后它们将会相交。

设：它们相交于一条直线*GH*。[XI. 3]

在*GH*上任取一点*K*，连接*AK*、*BK*。

因为：*AB*和平面*EF*成直角，

因此：*AB*和*BK*成直角，它是平面*EF*延展后上面的一条直线，[XI. 定义3]

因此：角*ABK*是直角。

同理：*BAK*也是直角，

所以：在三角形*ABK*中，两个角*ABK*、*BAK*都是直角。

这是不符合实际的，[I. 17]

因此：两平面*CD*、*EF*延展后不相交，

因此：平面*CD*、*EF*是平行的，[XI. 定义8]

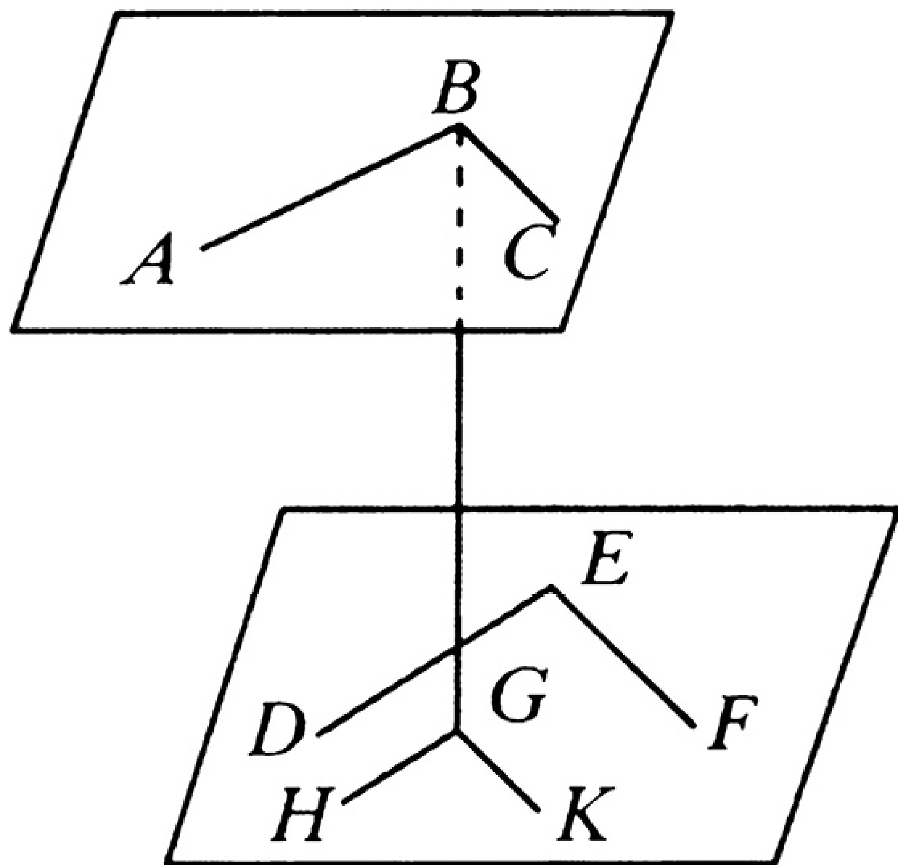
所以：和同一直线成直角的两个平面是平行的。

证完。

命题15

…

假如两条相交直线平行于不在同一平面上的另外两条相交直线，那么两对相交直线所在的平面平行。



设：两条相交直线*AB*、*BC*平行于不在同一平面上的另两条相交直线*DE*、*EF*。

那么可以说：延展后经过*AB*、*BC*的平面和经过*DE*、*EF*的平面不相

交。

从点B作直线BG垂直于经过DE、EF的平面。[XI. 11]

设：它交平面于点G。

过G作GH平行于ED，作GK平行于EF。[I. 31]

因为：BG和经过DE、EF的平面成直角，

因此：它也和经过DE、EF的平面内且和它相交的所有直线成直角。[XI. 定义3]

因为：在经过DE、EF的平面内两条直线GH、GK都和BG相交，

所以：角BGH和角BGK都是直角。

因为：BA平行于GH，[XI. 9]

所以：角GBA、BGH的和是两直角。[I. 29]

因为：角BGH是直角，

因此：角BGA也是直角，

所以：GB和BA成直角。

同理：GB也和BC成直角。

因为：直线GB和两相交的直线BA、BC成直角，

因此：GB也和经过BA、BC的平面成直角。[XI. 4]

又因：和同一直线成直角的两平面是平行的，[IX. 14]

所以：经过AB、BC的平面平行于经过DE、EF的平面，

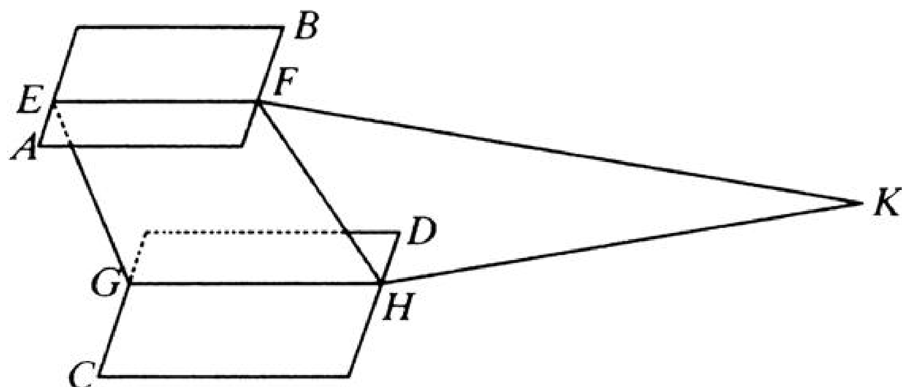
因此：如果两条相交直线平行于不在同一平面内的另两条相交直线，那么两对相交直线所在的平面平行。

证完。

命题16

…

倘若两平行平面被另一个平面所截，那么截得的交线是平行的。



设：两个平行平面*AB*、*CD*被平面*EFHG*所截，而*EF*、*GH*是它们的交线。

那么可以说：*EF*平行于*GH*。

倘若两条直线不平行，则延长两条直线*EF*、*GH*之后在*F*、*H*一方或*E*、*G*一方必相交。

设：两条直线延长后在*F*、*H*一侧首先相交于*K*。

因为：*EFK*在平面*AB*内，

因此：*EFK*上所有点也都在平面*AB*内。[XI. 1]

又因：*K*是直线*EFK*上的一个点，

因此：*K*在平面*AB*内。

同理：*K*也在平面*CD*内，

所以：两平面AB、CD延长后相交。

但是根据假设：它们是平行，不是相交，

所以：直线EF、GH延长后在F、H一方不相交。

同理可证：直线EF、GH在E、G一方延长后也不相交，

又因：在两方都不相交的直线是平行的，[I. 定义23]

因此：EF平行于GH。

证完。

命题17

…

倘若两直线被平行平面所截，那么截得的线段有相同的比。

设：两条直线AB、CD被平行平面GH、KL、MN所截，

它们的交点为A、E、B和C、F、D。

那么可以说：AE比EB如同CF比FD。

连接AC、BD、AD。

设：AD和平面KL相交于点O。

连接EO、OF。

因为：两个平行平面KL、MN被平面$EBDO$所截，

它们的交线EO、BD是平行的，[XI. 16]

同理：两平行平面GH、KL被平面$AOFC$所截，它们的交线AC、OF是平行的。[XI. 16]

因为：线段EO平行于三角形ABD的一边BD，

因此，有比例：AE比EB如同AO比OD。[VI. 2]

因为：直线OF平行于三角形ADC的一边AC，

因此，有比例：AO比OD如同CF比FD。[VI. 2]

又因，已经证明：AO比OD如同AE比EB，

因此：AE比EB如同CF比FD。[V. 11]

证完。

命题18

…

假如一条直线和某一平面成直角，那么经过此直线的所有平面都和这个平面成直角。

设：一条直线*AB*和已知平面成直角。

那么可以说：所有经过*AB*的平面也和此平面成直角。

作经过*AB*的平面*DE*。

设：*CE*是平面*DE*与已知平面的交线，在*CE*上任取一点*F*。

在平面*DE*内由*F*作*FG*与*CE*成直角。[I. 11]

因为：*AB*和已知平面成直角，且*AB*也和已知平面内和它相交的所有直线成直角，[XI. 定义3]

所以：*AB*也和*CE*成直角，

因此：角*ABF*是直角。

因为：角*GFB*也是直角，

所以：*AB*平行于*FG*。[I. 28]

因为：AB和已知平面成直角，

所以：FG也和已知平面成直角。[XI. 8]

因为：当从两平面之一上引直线和它们的交线成直角时，那么两平面成直角，[XI. 定义4]

又因：在平面DE内的直线FG和交线CE成直角，

且已经证明，和已知平面成直角，

平面DE和已知平面成直角。

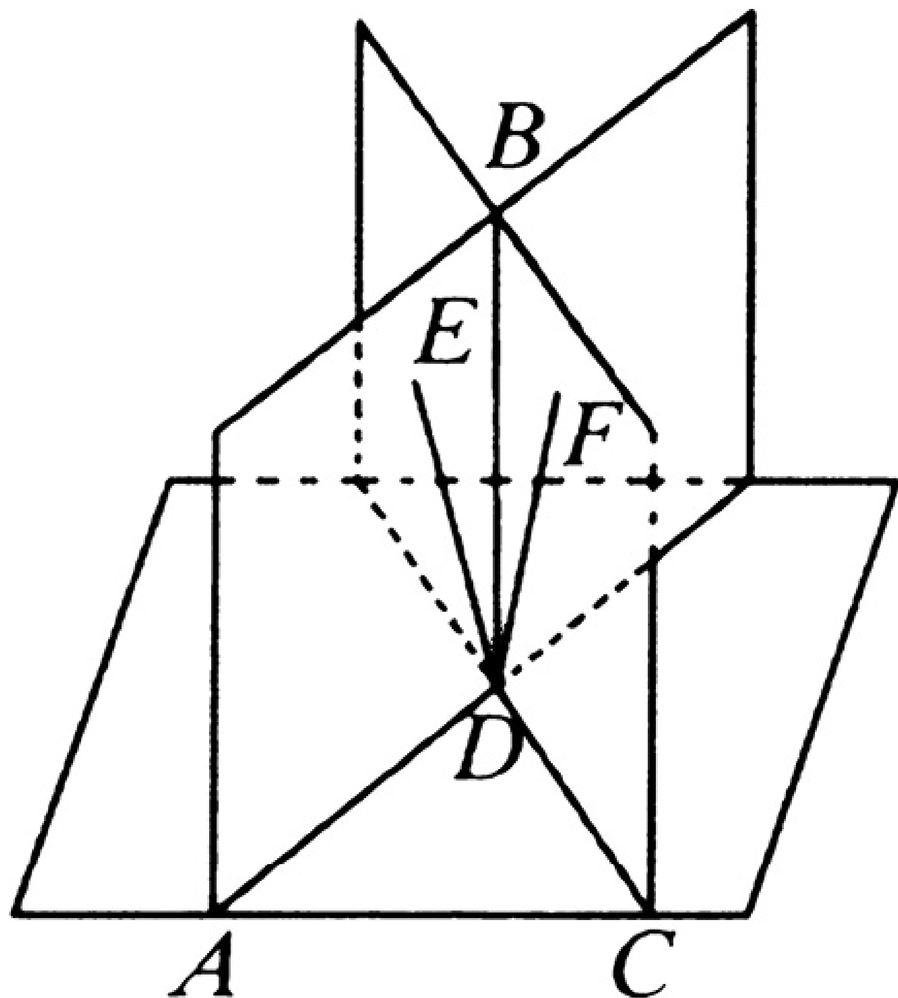
同理可证：经过AB的所有平面和已知平面成直角。

证完。

命题19

…

倘若两个相交的平面同时和一个平面成直角，那么它们的交线也和这个平面垂直。



设：两平面*AB*、*BC*与已知平面成直角，并且*BD*是它们的交线。

那么可以说：*BD*和已知平面成直角。

设：如果不成直角，

那么：由*D*在平面*AB*内作*DE*和直线*AD*成直角，

在平面*BC*内作*DF*和*CD*成直角。

因为：平面*AB*和已知平面成直角，

又在平面*AB*内所作的*DE*和它们的交线*AD*成直角，

所以：*DE*和已知平面垂直。[XI. 定义4]

同理可证：*DF*也和已知平面成直角，

因此：从同一点*D*在平面那一侧有两条直线和已知平面成直角，[XI. 13]

这是不符合实际的，

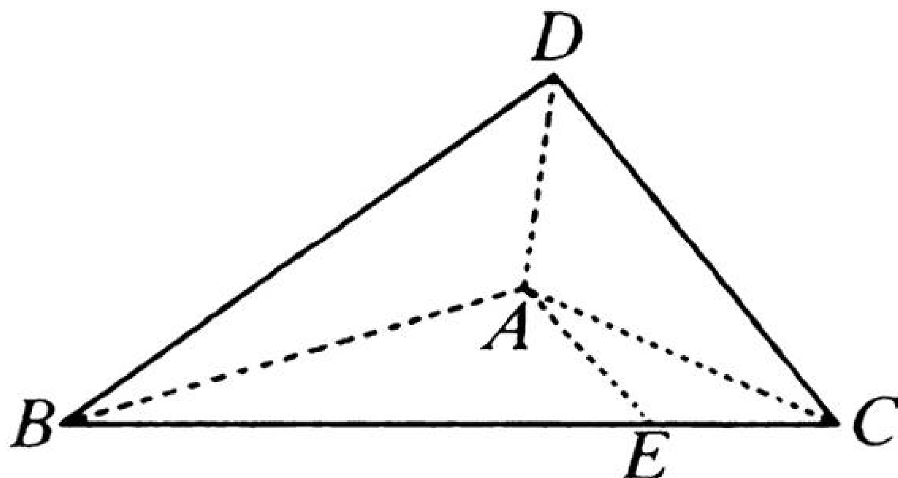
因此：除了平面*AB*、*BC*的交线*DB*外，从点*D*再作不出直线和已知平面成直角。

证完。

命题20

…

假如由三个平面角构成一个立体角，那么任何两个平面角的和大于第三个平面角。



设：由三个平面角*BAC*、*CAD*、*DAB*在点*A*围成立体角。

那么可以说：角*BAC*、*CAD*、*DAB*中的任何两个的和大于第三个。

设：角*BAC*、*CAD*、*DAB*彼此相等。

那么：任何两角之和大于第三个。

如果不是这样，就设：角*BAC*是较大的，

在经过*BA*、*AC*的平面内直线*AB*上点*A*处作角*BAE*等于角*DAB*；

让*AE*等于*AD*，并过点*E*引一直线*BEC*和直线*AB*、*AC*相交于*B*、*C*；

连接*DB*、*DC*。

因为：*AD*等于*AE*、*AB*是公共的，两边等于两边，

且角*DAB*等于角*BAE*，

因此：底*DB*等于底*BE*。[I. 4]

因为：两边*BD*、*DC*的和大于*BC*，[I. 20]

又已经证明：*DB*等于*BE*，

因此：余下的*DC*大于余下的*EC*。

因为：*DA*等于*AE*，而*AC*是公共的，并且底*DC*大于底*EC*，

因此：角*DAC*大于角*EAC*。[I. 25]

又因，已经证明：角*DAB*等于角*BAE*，

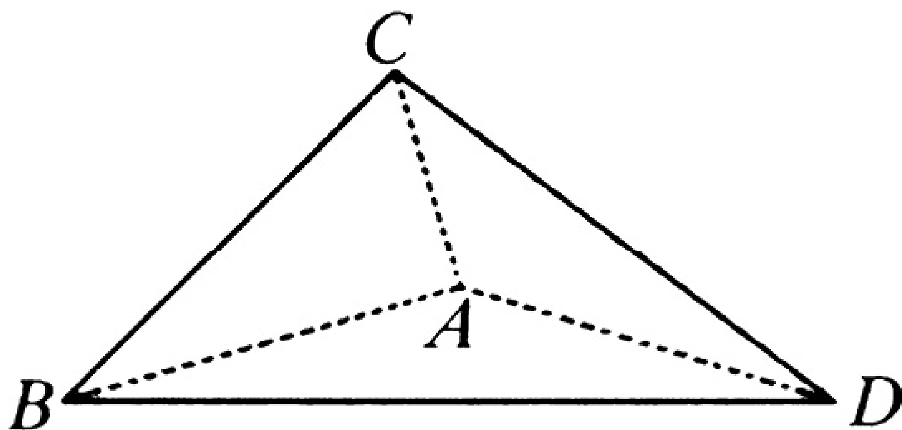
因此：角*DAB*、*DAC*的和大于角*BAC*。

同理可证：其余的角也是如此，任取两个面角的和大于其他的一个面角。

证完。

命题21

构成一个立体角的所有平面角的和小于四直角。



设：由平面角*BAC*、*CAD*、*DAB*在点*A*构成一个立体角。

那么可以说：角*BAC*、*CAD*、*DAB*的和小于四直角。

设：在直线*AB*、*AC*、*AD*上分别取一点*B*、*C*、*D*，

连接*BC*、*CD*、*DB*。

因为：在点*B*处的三个平面角*CBA*、*ABD*、*CBD*构成一个立体角，其中任何两个的和大于其余一个，[XI. 20]

因此：角*CBA*、*ABD*的和大于角*CBD*。

同理：角*BCA*、*ACD*的和大于角*BCD*，

并且角*CDA*、*ADB*的和大于角*CDB*，

因此：六个角*CBA*、*ABD*、*BCA*、*ACD*、*CDA*、*ADB*的和大于三个角*CBD*、*BCD*、*CDB*。

又因：三个角*CBD*、*BDC*、*BCD*的和等于两直角，[I. 32]

因此：六个角*CBA*、*ABD*、*BCA*、*ACD*、*CDA*、*ADB*的和大于二直

角。

因为：三角形*ABC*、*ACD*、*ADB*的每一个的三个角的和等于两直角，

因此：这三个三角形的九个角*CBA*、*ACB*、*BAC*、*ACD*、*CDA*、*CAD*、*ADB*、*DBA*、*BAD*的和等于六个直角。

又因：它们中六个角*ABC*、*BCA*、*ACD*、*CDA*、*ADB*、*DBA*的和大于两直角，

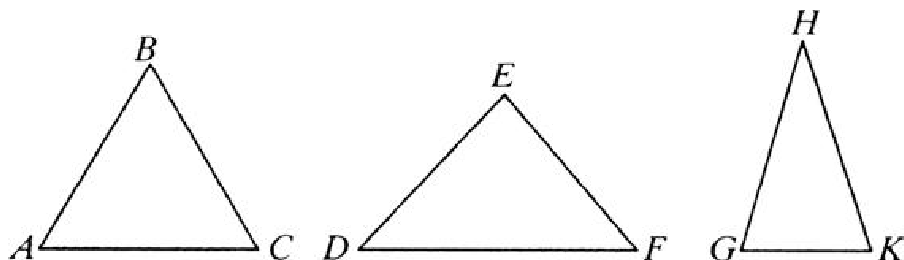
因此：其余的三个角*BAC*、*CAD*、*DAB*构成的立体角其面角的和小于四直角。

证完。

命题22

…

倘若有三个平面角，不论怎样选取，其中任意两个角的和大于第三个角，并且夹这些角的两边都相等，那么连接相等线段的端点的三条线段构成一个三角形。



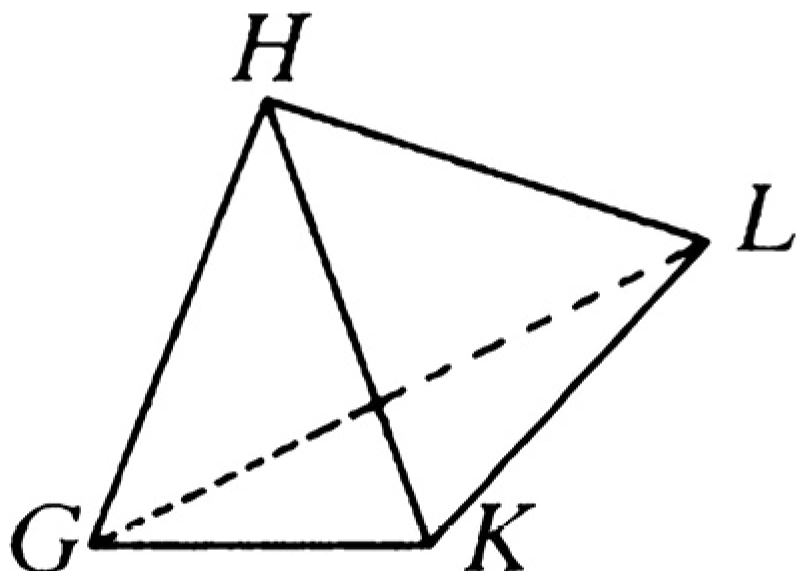
设：有三个平面角*ABC*、*DEF*、*GHK*，不论怎样选取其中任何两角的和大于第三个角。

也就是角*ABC*、*DEF*的和大于角*GHK*；

角*DEF*、*GHK*的和大于角*ABC*。

并且角GHK、ABC的和大于角DEF。

设：线段AB、BC、DE、EF、GH、HK是相等的，连接AC、DF、GK。



那么可以说：能作一个三边等于AC、DF、GK的三角形，也就是线段AC，DF，GK中任意两条的和大于第三条。

倘若角ABC、DEF、GHK彼此相等，可以得到AC、DF、GK也相等。

那么：可以作出三边等于AC、DF、GK的三角形。

设：它们不相等，在线段HK上的点H处作角KHL等于角ABC，

使HL等于线段AB、BC、DE、EF、GH、HK中的一条，

连接KL、GL。

因为：两边AB、BC等于两边HK、HL，

在B的角等于角KHL，

因此：底AC等于底KL。[I. 4]

因为：角*ABC*、*GHK*的和大于角*DEF*，

此时角*ABC*等于角*KHL*，

因此：角*GHL*大于角*DEF*。

因为：两边*GH*、*HL*等于两边*DE*、*EF*，并且角*GHL*大于角*DEF*，

因此：底*GL*大于底*DF*。[I. 24]

又因：*GK*、*KL*的和大于*GL*，

所以：*GK*、*KL*的和大于*DF*。

因为：*KL*等于*AC*，

所以：*AC*、*GK*的和大于其余的*DF*。

同理可证：*AC*、*DF*的和大于*GK*，

以及*DF*、*GK*的和大于*AC*，

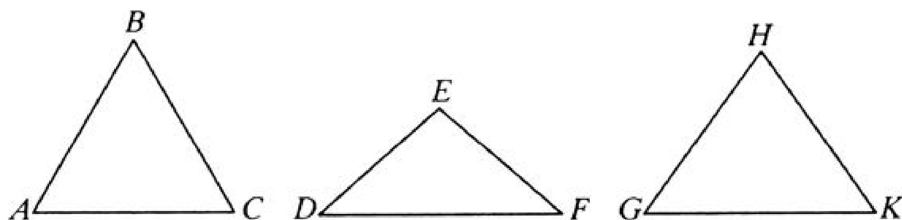
因此：可以作出三边等于*AC*、*DF*、*GK*的三角形。

证完。

命题23

…

已知在三个平面角中无论怎样选取任意两角的和都大于第三个角，并且三个角的和必小于四直角，求作由此三个平面角构成的立体角。



设：角ABC、DEF、GHK是三个已知的平面角，选取其中任意两个角的和大于余下的一个角，并且三个角的和小于四直角。

要求：作出面角等于角ABC、DEF、GHK的立体角。

截取彼此相等的线段AB、BC、DE、EF、GH、HK，连接AC、DF、GK。

由此，可以作出：一个三条边等于AC、DF、GK的三角形。[XI. 22]

设：作出三角形LMN，使AC等于LM，使DF等于MN，以及GK等于NL；

作出三角形LMN的外接圆LMN。

设：外接圆LMN的圆心为O，

连接LO、MO、NO。

那么可以说：AB大于LO。

如果不是这样，就设：AB或等于或小于LO。

先设：它们是相等的。

因为：AB等于LO，且AB等于BC，而OL等于OM，

两边AB、BC分别等于两边LO、OM，

根据假设：底AC等于底LM，

因此：角ABC等于角LOM。[I. 8]

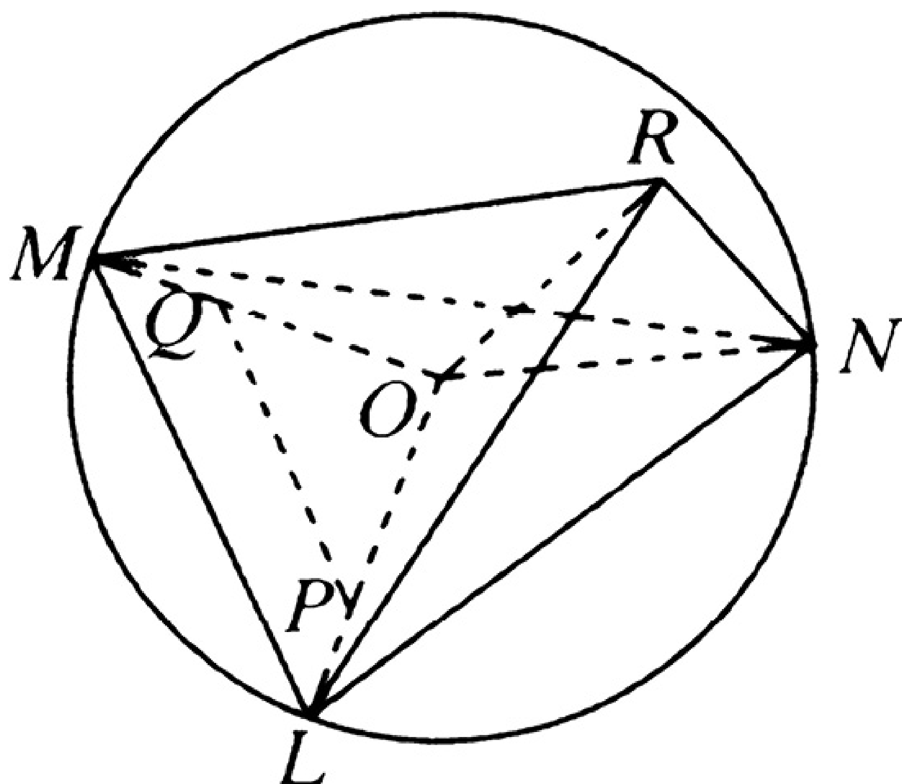
同理：角DEF等于角MON，

角GHK等于角NOL，

因此：三个角ABC、DEF、GHK的和等于三个角LOM、MON、NOL的和。

又因：三个角*LOM*、*MON*、*NOL*的和等于四直角，

因此：角*ABC*、*DEF*、*GHK*的和等于四直角。



又根据假设：它们小于四直角，

这是不符合实际的，

因此：*AB*不等于*LO*。

接下来可以证明：*AB*小于*LO*也不成立。

倘若可以成立，

作*OP*等于*AB*，且*OQ*等于*BC*，又连接*PQ*。

因为：*AB*等于*BC*，*OP*等于*OQ*，

所以：余量*LP*等于*QM*，

因此：*LM*平行于*PQ*，[VI. 2]

并且*LMO*与*PQO*是等角的，[I. 29]

因此：*OL*比*LM*如同*OP*比*PQ*。[VI. 4]

由更比：得*LO*比*OP*如同*LM*比*PQ*，[V. 16]

因为：*LO*大于*OP*，

所以：*LM*大于*PQ*。

又因，已知：*LM*等于*AC*，

因此：*AC*大于*PQ*。

因为：两边*AB*、*BC*等于两边*OP*、*OQ*，

且底*AC*大于底*PQ*，

所以：角*ABC*大于角*POQ*。[I. 25]

同理可证：角*DEF*大于角*MON*，以及角*GHK*大于角*NOL*，

因此：三个角*ABC*、*DEF*、*GHK*的和大于三个角*LOM*、*MON*、*NOL*的和。

又根据假设：角*ABC*、*DEF*、*GHK*的和小于四直角，

因此：角*LOM*、*MON*、*NOL*的和小于四直角。

又因：它们的和等于四直角，

这是不符合实际的，

因此：*AB*不小于*LO*。

又因，已经证明：*AB*与*LO*是不相等的，

所以：*AB*大于*LO*。

从点O作OR使它同圆LMN所在的平面成直角。[XI. 12]

令OR上的正方形等于一个面积，而这个面积是AB上的正方形比OL上的正方形所大的那部分。[引理]

连接RL、RM、RN。

因为：RO同圆LMN所在的平面成直角，

因此：RO也和线段LO、MO、NO的每一个成直角。

因为：LO等于OM，

并且OR是公共的，又和LO、ON都成直角，

所以：底RL等于底RM。[I. 4]

同理：RN等于线段RL、RM的每一个，

因此：三线段RL、RM、RN彼此相等。

又，根据假设：OR上的正方形等于AB上的正方形较OL上的正方形大的那部分，

所以：AB上的正方形等于LO、OR上的正方形的和。

又因：LR上的正方形等于LO、OR上的正方形的和，这是因为角LOR是直角，[I. 47]

因此：AB上的正方形等于RL上的正方形，

因此：AB等于RL。

因为：线段BC、DE、EF、GH、HK都等于AB，

此时线段RM、RN都等于RL，

那么：线段AB、BC、DE、EF、GH、HK中每一条都等于线段RL、RM、RN中的每一条。

因为：两边*LR*、*RM*等于两边*AB*、*BC*，

又根据假设：底*LM*等于底*AC*，

因此：角*LRM*等于角*ABC*。[I. 8]

同理：角*MRN*等于角*DEF*，角*LRN*等于角*GHK*，

所以：作了由三个平面角*LRM*、*MRN*、*LRN*在点*R*构成的立体角，

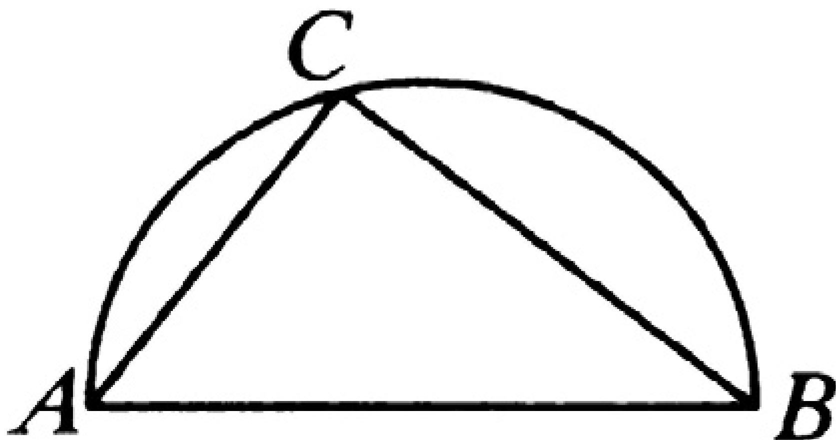
并且角*LRM*、*MRN*、*LRN*等于已知角*ABC*、*DEF*、*GHK*。

作完。

引理

…

如何作出**OR**上的正方形等于**AB**上的正方形与**LO**上的正方形差的面积。



设：取两线段*AB*、*LO*，其中*AB*是较大的。

在*AB*上作半圆*ABC*，在半圆*ABC*内作拟合线段*AC*等于线段*LO*，它不大于直径*AB*。[IV. 1]

连接*C*、*B*。

因为：角ACB是半圆ABC上弓形角，

因此：角ACB是直角，[III. 31]

所以：AB上的正方形等于AC上的正方形与CB上的正方形的和，

因此：在AB上的正方形大于AC上的正方形，大出的部分是CB上的正方形。

又因：AC等于LO，

因此：AB上的正方形大于LO上的正方形，大出的部分是CB上的正方形。

设：截取OR等于BC，

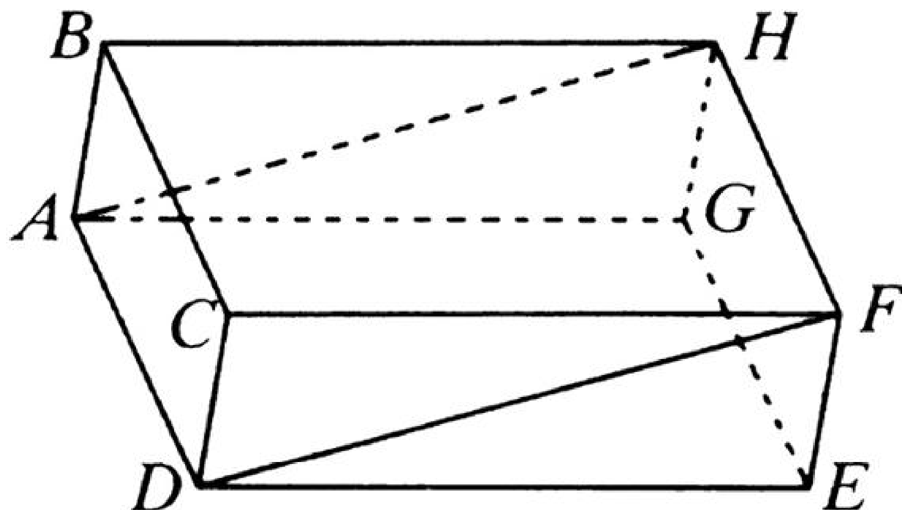
那么：AB上的正方形大于LO上的正方形，大出的部分是OR上的正方形。

作完。

命题24

…

倘若由一些平行平面围成一个立体，那么它们相对面相等，并且是平行四边形。



设：平行平面AC、GF、AH、DF、BF、AE围成一个立体CDHG。

那么可以说：它们对面相等，并且是平行四边形。

因为：两平行平面BG、CE被平面AC所截，

因此：它们的交线是平行的，[XI. 16]

所以：AB平行于DC。

因为：两平行平面BF、AE被平面AC所截，它们的交线平行，[XI. 16]

所以：BC平行于AD。

又因，已经证明：AB平行于DC，

因此：AC是平行四边形。

同理可证：平面DF、FG、GB、BF、AE的每一个都是平行四边形。

连接AH、DF，

因为：AB平行于DC，且BH平行于CF，

且相交两直线AB、BH平行于和它们不在同一平面上的两条直线

DC、*CF*，

因此：它们的夹角相等，[XI. 10]

所以：角*ABH*等于角*DCF*。

因为：两边*AB*、*BH*等于两边*DC*、*CF*，[I. 34]

并且角*ABH*等于角*DCF*，

所以：底*AH*等于底*DF*，三角形*ABH*等于三角形*DCF*。[I. 4]

因为：平行四边形*BG*是三角形*ABH*的二倍，平行四边形*CE*是三角形*DCF*的二倍，[I. 34]

因此：平行四边形*BG*全等于平行四边形*CE*。

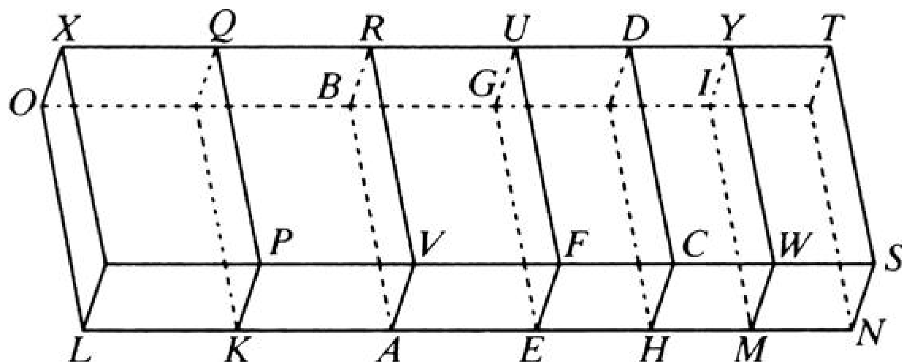
同理可证：*AC*等于*GF*，且*AE*等于*BF*。

证完。

命题25

…

倘若一个平行六面体被一个平行于一双相对面的平面所截，那么底比底如同立体比立体。



设：平行六面体ABCD被平行于两相对面RA、DH的平面FG所截。

那么可以说：AEFV比底EHCF如同立体ABFU比立体EGCD。

设：向两端延长AH，并取若干线段AK、KL等于AE。

又取若干线段HM、MN等于EH。

并完成平行四边形LP、KV、HW、MS和立体LQ、KR、DM、MT。

因为：线段LK、KA、AE彼此相等，平行四边形LP、KV、AF也彼此相等，

平行四边形KO、KB、AG彼此相等，且LX、KQ、AR是相对的面，也彼此相等。[XI. 24]

同理：平行四边形EC、HW、MS也彼此相等，

HG、HI、IN彼此相等；DH、MY、NT彼此相等，

所以：在立体LQ、KR、AU中彼此有三个平面相等。

又因：三个面等于三个相对的面，

所以：三个立体LQ、KR、AU彼此相等。

同理：三个立体ED、DM、MT也彼此相等，

因此：无论底LF是底AF的多少倍，立体LU也是立体AU的多少倍。

同理：底NF是底FH的多少倍，立体LU也是立体AU的多少倍，

倘若底LF等于底NF，立体LU等于立体NU；

倘若底LF大于底NF，立体LU大于立体NU；

倘若底LF小于底NF，立体LU小于立体NU，

所以：有四个量，两个底AF、FH和两个立体AU、UH，已给定底AF和立体AU的同倍量，

也就是底LF和立体LU。

已知：底HF和立体HU的同倍量，也就是底NF和立体NU，

并且已经证明：倘若底LF大于底FN，立体LU大于立体NU，

倘若底相等，立体也相等，

倘若底LF小于底FN，立体LU小于立体NU，

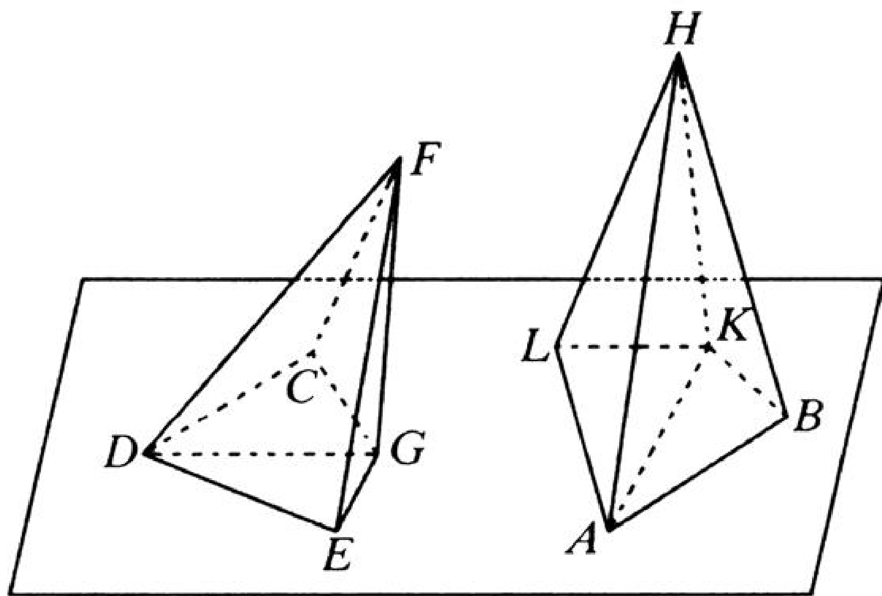
因此：底AF比底FH如同立体AU比立体UH。[V. 定义5]

证完。

命题26

…

在已知直线上一已知点，作一个立体角等于已知的立体角。



设：已知直线AB上有一点A，在D点处由角EDC、EDF、FDC构成一个等于已知的立体角。

要求：在AB上一点A作立体角等于在D点的立体角。

设：在DF上任取一点F，从F处FG垂直于经过ED、DC的平面，并且和此面相交于G。[XI. 11]

连接DG，在直线AB上的点A处作角BAL等于角EDC，再作角BAK等于角EDG。[I. 23]

使AK等于DG。

从点K作KH使它和经过BA、AL的平面成直角。[XI. 12]

设：KH等于GF，连接H、A。

那么可以说：在A处由角BAL、BAH、HAL围成的立体角等于在D处的角EDC、EDF、FDC围成的立体角。

设：截DE等于AB，连接HB、KB、FE、GE。

因为：FG与已知平面成直角，

那么：它与平面上和它相交的一切直线成直角，[XI. 定义3]

因此：角FGD、FGE都是直角。

同理：角HKA、HKB每一个也都是直角。

又因：两边KA、AB分别等于两边GD、DE，并且它们夹着相等的角，

因此：底KB等于底GE。[I. 4]

因为：KH等于GF，且它们成直角，

由此：HB等于FE。[I. 4]

因为：两边AK、KH分别等于DG、GF，并且它们成直角，

所以：底AH等于底FD。[I. 4]

又因：AB等于DE，

因此：两边HA、AB等于两边DF、DE。

因为：底HB等于底FE，

所以：角BAH等于角EDF，[I. 8]

同理：角HAL等于角FDC，

角BAL等于角EDC，

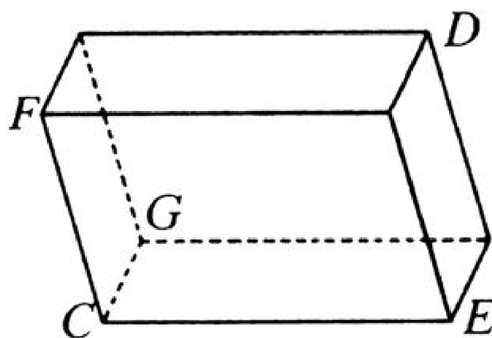
因此：在直线AB的点A处作出的立体角等于已知点D处的立体角。

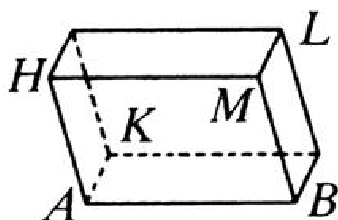
作完。

命题27

…

在已知线段上作已知平行六面体的相似且有相似位置的平行六面体。





设：已知线段AB，以及平行六面体CD。

那么：要在已知线段AB上作已知平行六面体CD的相似且有相似位置的平行六面体。

设：在线段AB上的点A处作一个由角BAH、HAK、KAB构成的立体角等于在点C处的立体角，

也就是角BAH等于角ECF，角BAK等于角ECG，以及角KAH等于角GCF，

并且已经取定了EC比CG如同BA比AK，

GC比CF如同KA比AH。[VI. 12]

因此，有首末比：EC比CF如同BA比AH。[V. 22]

设：已经作出了平行四边形HB和补形立体AL。

因为：EC比CG如同BA比AK，

并且夹相等角ECG、BAK的边成比例，

所以：平行四边形GE相似于平行四边形KB。

同理：平行四边形KH也相似于平行四边形GF，且EF相似于HB，

因此：立体CD的三个平行四边形相似于立体AL的三个平行四边形。

因为：前面三个与它们相对面的平行四边形是相等且相似的，并且后面三个和它们相对面的平行四边形是相等且相似的，

所以：整体立体CD相似于整体立体AL，[XI. 定义9]

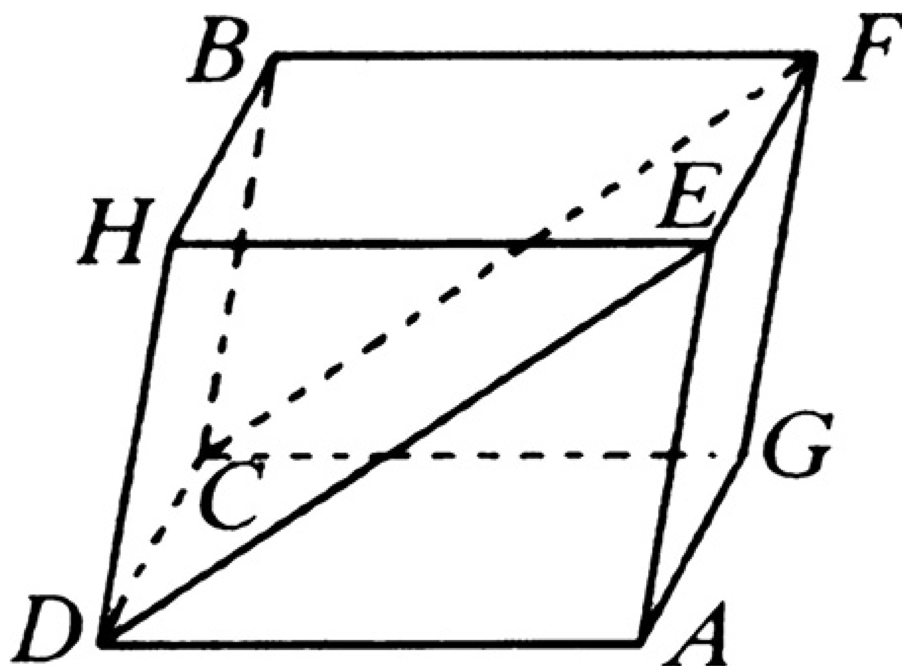
因此：在已知线段AB上作了已知平行六面体CD的相似且有相似位置的立体AL。

作完。

命题28

…

假如一个平行六面体被相对面上对角线所在的平面所截，那么此立体被平面二等分。



设：平行六面体*AB*被相对面上对角线*CF*、*DE*所在的平面*CDEF*所截。

那么可以说：*AB*被平面*CDEF*平分。

因为：三角形*CGF*等于三角*CFB*，[I. 34]

且*ADE*全等于*DEH*，平行四边形*CA*等于平行四边形*EB*，

又因：它们是相对的面，且*GE*等于*CH*，

因此：两个三角形*CGF*、*ADE*和三个平行四边形*GE*、*AC*、*CE*围成的棱柱等于由两个三角形*CFB*、*DEH*和三个平行四边形*CH*、*BE*、*CE*围成的棱柱。

又因：两棱柱是由同样多个两两相等的面所组成的，[XI. 定义10]

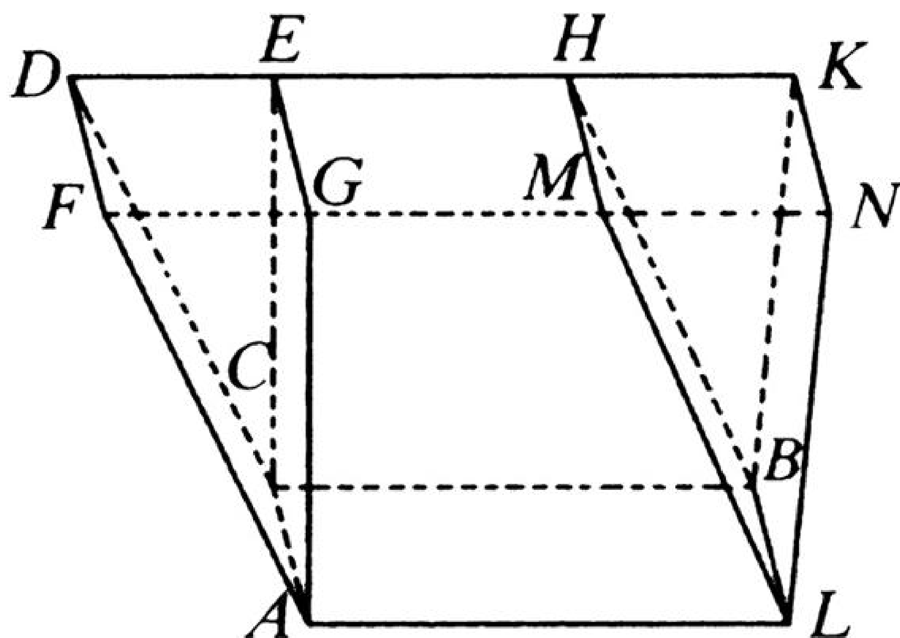
因此：整体立体*AB*被平面*CDEF*平分。

证完。

命题29

…

具有同底同高的两个平行六面体，并且它们立于底上的侧棱的端点在同一直线上，那么它们是彼此相等的。



设：*CM*、*CN*是有同底*AB*和同高的两个平行六面体，且它们立于底上的侧棱*AG*、*AF*、*LM*、*LN*、*CD*、*CE*、*BH*、*BK*的端点分别在两条直线*FN*、*DK*上。

那么可以说：立体*CM*等于立体*CN*。

因为：图形*CH*、*CK*的每一个都是平行四边形，*CB*等于线段*DH*、*EK*的每一个，[I. 34]

所以：*DH*等于*EK*。

设：从以上各边减去*EH*，

那么：余下的*DE*等于余下的*HK*，

所以：三角形*DCE*等于三角形*HBK*，[I. 8， 4]

并且平行四边形*DG*等于平行四边形*HN*。[I. 36]

同理：三角形*AFG*等于三角形*MLN*。

又因：平行四边形*CF*等于平行四边形*BM*，且*CG*和*BN*是相对的面，也就是*CG*等于*BN*，

所以：由两个三角形*AFG*、*DCE*和三个平行四边形*AD*、*DG*、*CG*围成的棱柱等于由两个三角形*MLN*、*HBK*和三个平行四边形*BM*、*HN*、*BN*组成的棱柱，

又以平行四边形*AB*为底，对面是*GEHM*的立体加到每一个棱柱上，

因此：整体平行六面体*CM*等于整体平行六面体*CN*。

证完。

命题30

…

具有同底同高的二平行六面体，它们立于底上的侧棱的端点不在相同的直线上，那么它们是彼此相等的。

设：CM、CN是具有同底AB和同高的二平行六面体。

它们立于底上的侧棱，也就是AF、AG、LM、LN、CD、CE、BH、BK的端点不在相同直线上。

那么可以说：立体CM等于立体CN。

延长NK、DH相交于R，又延长FM、GE至P、Q，

连接AO、LP、CQ、BR，

因此：以平行四边形$ACBL$为底，且对面为$FDHM$的立体CM，等于以平行四边形$ACBL$为底，对面为$OQRP$的立体CP。

因为：它们同底$ACBL$，并且同高。并且它立于底上的侧棱AF、AO、LM、LP、CD、CQ、BH、BR的端点分别在两条直线FP、DR上，[XI. 29]

又因：以平行四边形$ACBL$为底，且对面为$OQRP$的立体CP，等于以平行四边形$ACBL$为底，且对面为$GEKN$的立体CN，

又因：它们同底*ACBL*，并且同高，

并且它们立于底上的侧棱*AG*、*AO*、*CE*、*CQ*、*LN*、*LP*、*BK*、*BR*的端点分别在两条直线*GQ*、*NR*上，

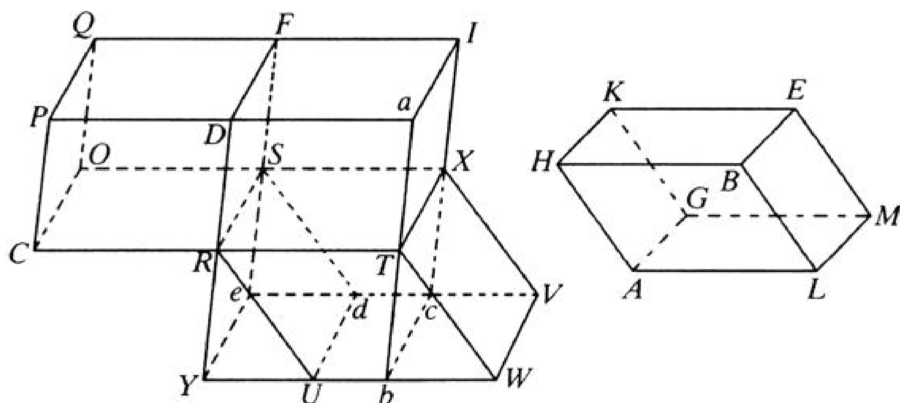
所以：立体*CM*等于立体*CN*。

证完。

命题31

…

等底同高的平行六面体彼此相等。



设：二平行六面体*AE*、*CF*有相同的高和相等的底*AB*、*CD*。

那么可以说：立体*AE*等于立体*CF*。

先设：两个平行六边形的侧棱*HK*、*BE*、*AG*、*LM*、*PQ*、*DF*、*CO*、*RS*与底*AB*、*CD*成直角。

延长线段*CR*得线段*RT*，

在线段*RT*上的点*R*作一个角*TRU*等于角*ALB*。[I. 23]

使*RT*等于*AL*，且*RU*等于*LB*，

又在底RW上作立体XU。

因为：两边TR、RU等于两边AL、LB，并且夹角相等，

所以：平行四边形RW与平行四边形HL相等且相似。

因为：AL等于RT，且LM等于RS，并且它们交成直角，

所以：平行四边形RX等于且相似于平行四边形AM。

同理：LE等于且相似于SU，

因此：立体AE的三个平行四边形相等且相似于立体XU的三个平行四边形。

因为：前面的三个相等且相似于三个对面的平行四边形，后面的三个相等且相似于它们对面的平行四边形，[XI. 24]

因此：整体平行六面体AE等于整体平行六面体XU。[XI. 定义10]

延长DR、WU交于点Y，过T作aTb平行于DY，将PD延长至a，

作出补形立体YX、RI，

因此：以平行四边形RX为底和Yc为对面的立体XY等于以平行四边形RX为底和以UV为对面的立体XU。

因为：它们在同一个底RX上且有相同的高，

且它们侧棱RY、RU、Tb、TW、Se、Sd、Xc、XV的端点在两条直线YW、eV上，[XI. 29]

又因：立体XU等于立体AE，

所以：立体XY等于立体AE。

因为：平行四边形$RUWT$等于平行四边形YT，

且它们在同一个底RT上，且在相同的平行线RT、YW之间，[I. 35]

又因：平行四边形$RUWT$等于平行四边形CD，这是因为它等于AB，

因此：平行四边形YT等于CD。

因为：DT是另一个平行四边形，

因此：CD比DT如同YT比DT。[V. 7]

因为：平行六面体CI被平行于二对面的平面RF所截，

因此：底CD比DT如同立体CF比立体RI。[XI. 25]

同理，因为：平行六面体YI被平行于二对面的平面RX所截，

所以：底YT比底TD如同立体YX比立体RI。[XI. 25]

因为：底CD比DT如同YT比DT，

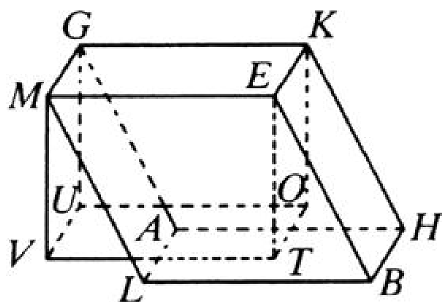
所以：立体CF比立体RI如同立体YX比立体RI，[V. 11]

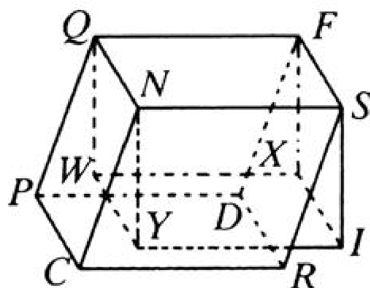
因此：立体CF、YX中每一个与RI有相同的比，

所以：立体CF等于立体YX。[V. 9]

又因，已经证明：立体YX等于立体AE，

所以：立体AE等于立体CF。





又设：两立体的侧棱AG、HK、BE、LM、CN、PQ、DF、RS与底面AB、CD不成直角，

那么可以证明：AE等于立体CF。

从点*K*、*E*、*G*、*M*、*Q*、*F*、*N*、*S*作*KO*、*ET*、*GU*、*MV*、*QW*、*FX*、*NY*、*SI*垂直于原来的平面，并且它们交此平面于点*O*、*T*、*U*、*V*、*W*、X、*Y*、*I*。

连接*OT*、*OU*、*UV*、*TV*、*WX*、*WY*、*YI*、*IX*。

因为：立体*KV*和立体*QI*有同底*KM*、*QS*和相同的高，

并且它们的侧棱和它们的底成直角，

因此：立体*KV*等于立体*QI*。[本命题第一部分]

又因：立体*KV*等于立体*AE*，且*QI*等于*CF*，这是因为它们同底等高，且侧棱的端点不在同一直线上，

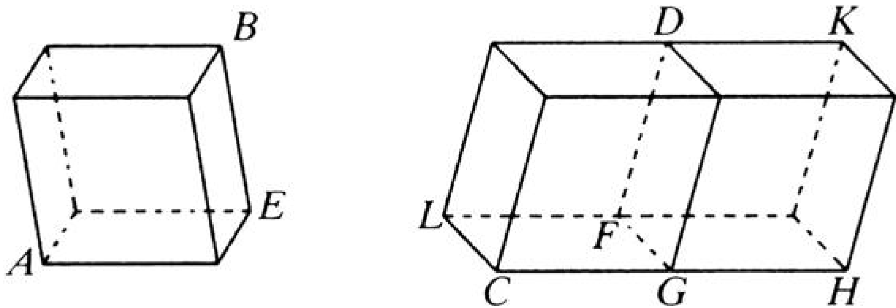
因此：立体*AE*等于立体*CF*。[XI. 30]

证完。

命题32

…

等高的两个平行六面体的比如同两底的比。



设：*AB*、*CD*是等高的两个平行六面体。

那么可以说：平行六面体*AB*、*CD*的比如同两底的比，

也就是底*AE*比底*CF*如同立体*AB*比立体*CD*。

在*FG*处作*FH*等于*AE*，[I. 45]

以*FH*为底，以*CD*的高为高，完成一个平行六面体*GK*，

所以：立体*AB*等于立体*GK*。

因为：它们有等底*AE*、*FH*，且与*CD*有相等的高，[XI. 31]

并且平行六面体*CK*被平行于二对面的平面*DG*所截，

因此：底*CF*比底*FH*如同立体*CD*比立体*DH*。[XI. 25]

又因：底*FH*等于底*AK*，并且立体*GK*等于立体*AB*，

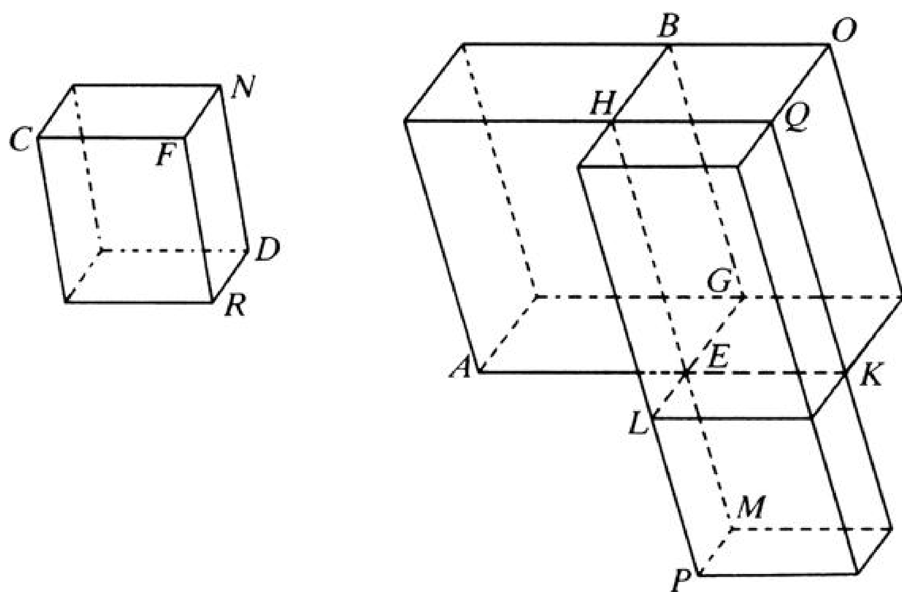
因此：底*AE*比底*CF*如同立体*AB*比立体*CD*。

证完。

命题33

…

两相似平行六面体的比如同对应边的三次比。



设：AB、CD是两个相似平行六面体，并且边AE对应边CF。

那么可以说：立体AB比立体CD如同AE与CF的三次比。

设：在AE、GE、HE延长线上作EK、EL、EM，

并且使EK等于CF，使EL等于FN，以及EM等于FR。

作平行四边形KL和补形平行六面体KP。

因为：两边KE、EL等于两边CF、FN，

此时，角KEL等于角CFN，

又因：AB、CD两立体相似，

所以：角AEG等于角CFN，

因此：平行四边形KL相等且相似于平行四边形CN。

同理：平行四边形KM等于且相似于CR，以及EP相等且相似于DF，

因此：立体KP的三个平行四边形相等且相似于立体CD的三个平行四边形。

因为：前面的三个平行四边形与它们的对面相等且相似，后面的三个平行四边形与它们的对面相等且相似，[XI. 24]

由此：整体立体KP相等且相似于整体立体CD，[XI. 定义10]

作平行四边形GK，并且以平行四边形GK、KL为底，

以AB的高为高，作立体EO、LQ。

因为：立体AB、CD相似，

因此：AE比CF如同EG比FN，又如同EH比FR。

因为：CF等于EK，且FN等于EL，并且FR等于EM，

因此：AE比EK如同GE比EL，又如同HE比EM。

因为：AE比EK如同AG比平行四边形GK，

而GE比EL如同GK比KL，

又因：HE比EM如同QE比KM，[VI. 1]

所以：平行四边形AG比GK如同GK比KL，

如同QE比KM。

因为：AG比GK如同立体AB比立体EO；

GK比KL如同立体OE比立体QL；

QE比KM如同立体QL比立体KP，[XI. 32]

因此：立体AB比EO如同EO比QL，也如同QL比KP。

又因：假如四个量成连比例，那么第一与第四量的比如同第一与第二量比的三次比，[V. 定义10]

因此：立体AB比KP如同AB比EO的三次比。

又因：AB比EO如同平行四边形AG比GK，也如同线段AE比EK，

并且立体AB与KP的比如同AE与EK的三次比，

又因：立体KP等于立体CD，线段EK等于CF，

因此：立体AB比立体CD也如同对应边AE与CF的三次比。

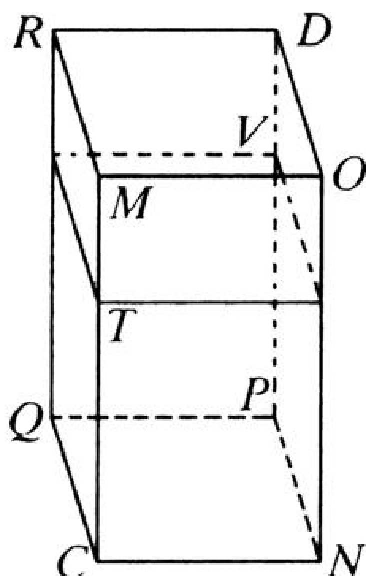
证完。

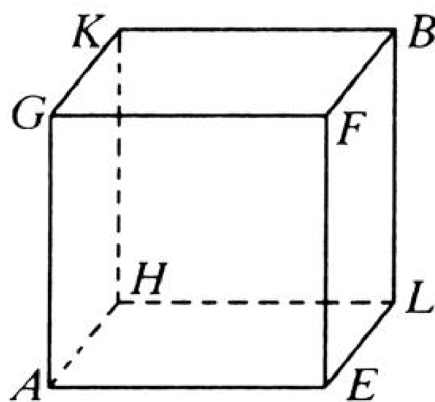
推论　由此得出，倘若四条线段成连比例，那么，第一与第四线段的比如同第一线段上的平行六面体比第二线段上与之相似且有相似位置的平行六面体的比，因为第一与第四项的比如同第一与第二项比的三次比。

命题34

…

相等的平行六面体，它们的底和高成互反比例。并且，底和高成互反比例的平面六面体相等。





设：*AB*、*CD*是相等的平行六面体。

那么可以说：在平行六面体*AB*，*CD*中，底与高成互反比例，

也就是底*EH*比底*NQ*如同立体*CD*的高比立体*AB*的高。

先设：侧棱*AG*、*EF*、*LB*、*HK*、*CM*、*NO*、*PD*、*QR*和它们的底成直角，

那么可以说：底*EH*比底*NQ*如同*CM*比*AG*。

倘若底*EH*等于底*NQ*，

那么：立体*AB*等于立体*CD*，

所以：*CM*等于*AG*。

因为：等高的两个平行六面体相比如同两底的比，[XI. 32]

所以：底EH比NQ如同CM比AG，

那么：在平行六面体AB、CD中，它们的底与高成互反比例。

又设：底EH不等于底NQ，且EH较大，

因为：立体AB等于立体CD，

因此：CM大于AG，

作CT等于AG，并且以NQ为底，在其上作补形平行六面体VC，它的高是CT。

因为：立体AB等于立体CD，并且CV是和它们不同的立体，等量与同一量的比也相同，[V. 7]

因此：立体AB比立体CV如同立体CD比立体CV。

因为：立体AB比立体CV如同底EH比底NQ，

且立体AB、CV等高，[XI. 32]

又因：立体CD比立体CV如同底MQ比底TQ，[XI. 25]

等于CM比CT，[VI. 1]

因此：底EH比底NQ如同MC比CT。

因为：CT等于AG，

因此：底EH比底NQ如同MC比AG，

所以：在平行六面体AB、CD中，它们的底与高成互反比例。

再设：在平行六面体AB、CD中，它们的底与高成互反比例，

也就是底EH比底NQ如同立体CD的高比立体AB的高，

那么可以说：立体AB等于立体CD。

设：侧棱与底面成直角。

倘若，底EH等于底NQ，

底EH比底NQ如同立体CD的高比立体AB的高，

因此：立体CD的高等于立体AB的高。

又因：等底等高的平行六面体相等，[XI. 31]

因此：立体AB等于立体CD。

再设：底EH不等于底面NQ，而EH是较大的，

由此：立体CD的高大于立体AB的高，也就是CM大于AG。

又取CT等于AG，类似地完成平行六面体CV，

因为：底EH比底NQ如同MC比AG，且AG等于CT，

所以：底EH比底NQ如同CM比CT。

又因：底EH比底NQ如同立体AB比立体CV，

因为：立体AB、CV等高，[XI. 32]

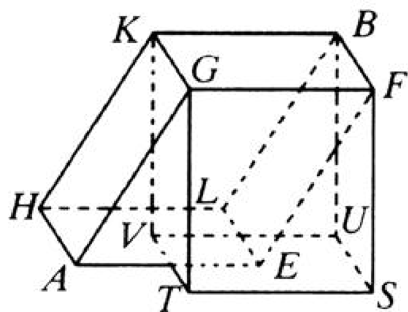
又：底CM比底CT如同MQ比QT，[VI. 1]

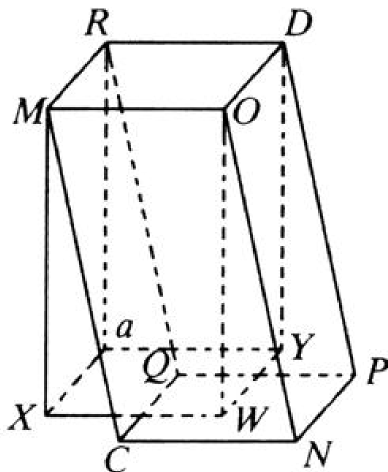
也如同立体CD比立体CV，[XI. 25]

因此：立体AB比立体CV如同立体CD比立体CV，

所以：立体AB、CD与CV有相同的比，

因此：立体AB等于立体CD。[V. 9]





设：侧棱*FE*、*BL*、*GA*、*HK*、*ON*、*DP*、*MC*、*RQ*和它们的底不垂直。

从点*F*、*G*、*B*、*K*、*O*、*M*、*D*、*R*向经过*EH*、*NQ*的平面作垂线交平面于*S*、*T*、*U*、*V*、*W*、*X*、*Y*、*a*。

完成立体*FV*于*Oa*。

那么可以说：倘若立体*AB*、*CD*相等，

那么：它们的底和高成互反比例，也就是底*EH*比*NQ*如同立体*CD*的高比立体*AB*的高。

因为：立体*AB*等于立体*CD*，且*AB*等于*BT*，

并且它们有相同的底*FK*和相等的高，[XI. 29，30]

又因：立体*CD*等于*DX*，这是因为它们有相同的底*RO*和相等的高，[XI. 29，30]

所以：立体*BT*等于立体*DX*，

因此：底*FK*比底*OR*如同立体*D*X的高比立体*BT*的高。[部分1]

因为：底*FK*等于底*EH*，

底OR等于底NQ，

所以：底EH比底NQ如同立体DX的高比立体BT的高。

因为：立体DX、BT分别和立体DC、BA同高，

所以：底EH比NQ如同立体DC的高比立体AB的高，

因此：在平行六面体AB、CD中，底与它们的高成互反比例。

设：在平行六面体AB、CD中，底与高成互反比例，也就是底EH比底NQ如同立体CD的高比立体AB的高。

那么可以说：立体AB等于立体CD。

用同一图形。

因为：底EH比底NQ如同立体CD的高比立体AB的高，底EH等于底FK，而NQ等于OR，

所以：底FK比底OR如同立体CD的高比立体AB的高。

因为：立体AB、CD和立体BT、DX分别有相同的高，

因此：底FK比底OR如同立体DX的高比立体BT的高，

所以：在平行六面体BT、DX中，底与高成互反比例，

所以：立体BT等于立体DX。[部分1]

又因：BE与BA有相同的底FK，并且等高，

因此：BT等于BA。[XI. 29，30]

又因：立体DX等于立体DC，[XI. 29，30]

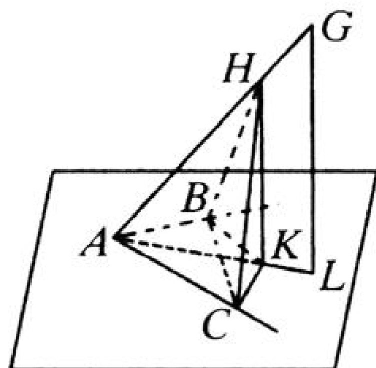
因此：立体AB等于立体CD。

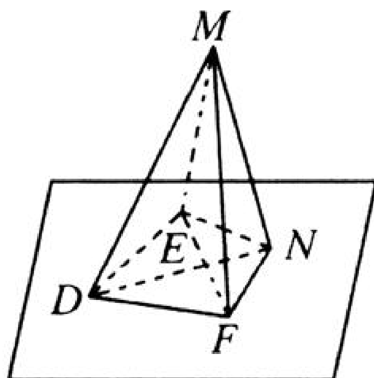
证完。

命题35

…

倘若有两个相等的平面角，过它们的顶点分别在平面外作直线，与原直线分别成等角。假如在所作面外二直线上各任取一点，由此点向原来角所在的平面作垂线，那么垂线与平面的交点和角顶点的连线与面外直线交成等角。





设：*BAC*、*EDF*是两个相等的直线角，

由点*A*、*D*各作面外直线*AG*、*DM*，它们分别和原直线所成的角两两相等，也就是角*MDE*等于角*GAB*，角*MDF*等于角*GAC*。

在*AG*、*DM*上各取一点*G*与点*M*。由点*G*、*M*分别作经过*BA*、*AC*的平面和经过*ED*、*DF*的平面的垂线*GL*、*MN*，并且和两平面各交于*L*、*N*。

连接*LA*、*ND*。

那么可以说：角*GAL*等于角*MDN*。

截取*AH*等于*DM*，

过点*H*作平行于*GL*的直线*HK*。

因为：*GL*垂线经过*BA*、*AC*的平面，

因此：HK垂直于经过BA、AC的平面。[XI. 8]

设：由点K、N作直线KC、NF、KB、NE分别垂直于直线AC、DF、AB、DE，

并且连接HC、CB、MF、FE。

因为：HA上的正方形等于HK与KA上的正方形的和，

并且和KC、CA上的正方形的和等于KA上的正方形，[I. 47]

因此：HA上的正方形等于HK、KC、CA上的正方形的和。

因为：HC上的长方形等于HK、KC上的正方形的和，[I. 47]

因此：HA上的正方形等于HC、CA上的正方形的和，

因此：角HCA是直角。[I. 48]

同理：角DFM是直角，

由此：角ACH等于角DFM。

又因：角HAC等于角MDF，

所以：两三角形MDF和HAC有两个角分别等于两个角，一条边等于另一条边，也就是等角所对的边HA等于MD，

因此：其余的边等于其余的边，[I. 26]

所以：AC等于DF。

同理可证：AB等于DE。

因为：AC等于DF，且AB等于DE，也就是两边CA、AB分别等于两边FD、DE，

又因：角CAB等于角FDE，

所以：底BC等于底EF，三角形全等于三角形，其余的角等于其余的

角，[I. 4]

因此：角ACB等于DFE。

又因：直角ACK等于直角DFN，

因此：其余的角BCK等于其余的角EFN。

同理：角CBK等于角FEN，

所以：两三角形BCK、EFN有两角及其夹边分别相等，也就是BC等于EF，

因此：其余的边也分别等于其余的边，[I. 26]

因此：CK等于FN。

因为：AC等于DF，

所以：两边AC、CK等于两边DF、FN，并且夹角都是直角，

所以：底AK等于底DN。[I. 4]

因为：AH等于DM，并且AH上的正方形等于DM上的正方形，

又因：AKH是直角，

因此：AK、KH上的正方形的和等于AH上的正方形。[I. 47]

因为：DNM是直角，

所以：DN、NM上的正方形的和等于DM上的正方形，

因此：AK、KH上的正方形的和等于DN、NM上的正方形的和。

因为：AK上的正方形等于DN上的正方形，

因此：其余的在KH上的正方形等于NM上的正方形，

由此：HK等于MN。

因为：两边HA、AK分别等于MD、DN，

并且已经证明：底HK等于底MN，

因此：角HAK等于角MDN。[I. 8]

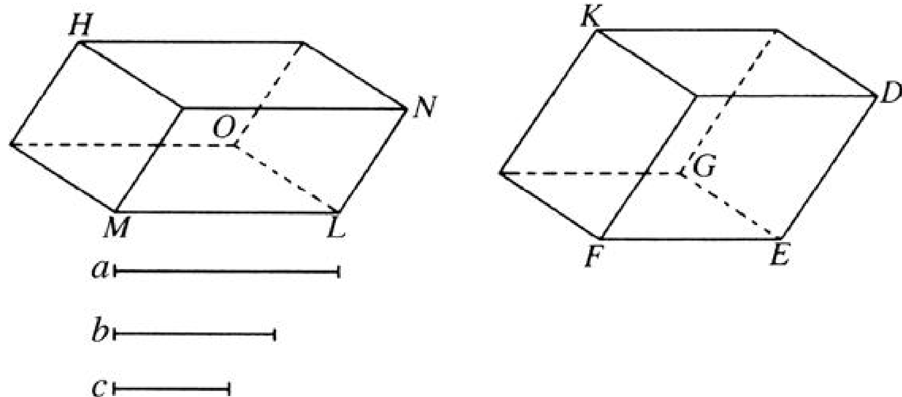
证完。

推论 假如有两个相等的平面角，从角顶分别作面外的相等线段，并且此线段和原角两边夹角分别相等。那么，从面外线段端点向角所在的平面所作的垂线相等。

命题36

…

假如有三条线段成比例，那么以这三条线段作成的平行六面体等于中项上所作的等边且与前面作成的立体等角的平行六面体。



设：已知三条成比例的线段a、b、c。

也就是a比b如同b比c。

那么可以说：由a、b、c所作成的立体等于在b上作出的等边且与前面的立体等角的立体。

在点E的立体角由三个角DEG、GEF、FED围成，

取三线段DE、GE、EF等于b，作出补形平行六面体EK，

让LM等于a，在直线LM的点L处作一个立体角等于在点E的立体角，也就是由NLO、OLM、MLN构成的角，让LO等于b，让LN等于c。

因为：a比b如同b比c，

且a等于LM，b等于线段LO、ED的每一个，c等于LN，

因此：LM比EF如同DE比LN，

所以：夹两等角NLM、DEF的边成互反比例，

因此：平行四边形MN等于平行四边形DF。[VI. 14]

因为：角DEF、NLM是两个平面直线角且两个平面外的线段LO、EG彼此相等，

它们和原平面角两边的夹角分别相等，

因此：从点G、O向经过NL、LM和DE、EF的平面所作的垂线相等，[XI. 35，推论]

因此：两个立体LH、EK有相同的高。

又因：等底等高的平行六面体是相等的，[XI. 31]

所以：立体HL等于立体EK。

因为：LH是由a、b、c构成的立体，EK是由b构成的立体，

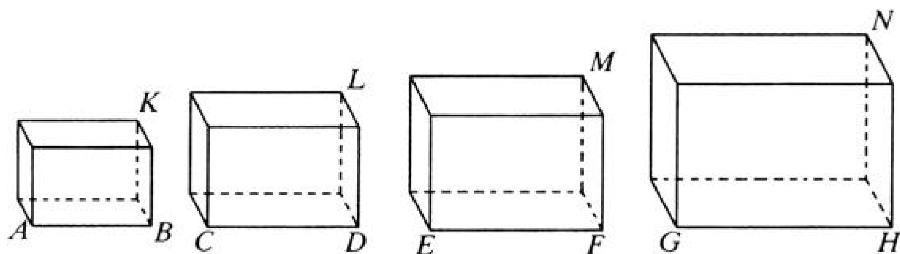
因此：由a、b、c构成的平行六面体等于在b上作的等边且与前面的立体等角的立体。

证完。

命题37

…

倘若四条线段成比例，那么在它们上作的相似且有相似位置的平行六面体也成比例。倘若在每一线段上所作相似且有相似位置的平行六面体成比例，那么此四线段也成比例。



设：*AB*、*CD*、*EF*、*GH*四线段成比例，也就是*AB*比*CD*如同*EF*比*GH*；

在*AB*、*CD*、*EF*、*GH*上作相似且有相似位置的平行六面体*KA*、*LC*、*ME*、*NG*，

那么可以说：*KA*比*LC*如同*ME*比*NG*。

因为：平行六面体*KA*与*LC*相似，

因此：*KA*与*LC*的比如同*AB*与*CD*的三次比。[XI. 33]

同理：*ME*比*NG*如同*EF*与*GH*的三次比。[XI. 33]

因为：*AB*比*CD*如同*EF*比*GH*，

所以：*AK*比*LC*如同*ME*比*NG*。

设：立体*AK*比立体*LC*如同立体*ME*比立体*NG*，

那么可以说：*AB*比*CD*又如同*EF*比*GH*。

因为：*KA*与*LC*的比如同*AB*与*CD*的三次比，[XI. 33]

并且*ME*与*NG*的比如同*EF*与*GH*的三次比，[XI. 33]

又因：*KA*比*LC*如同*ME*比*NG*，

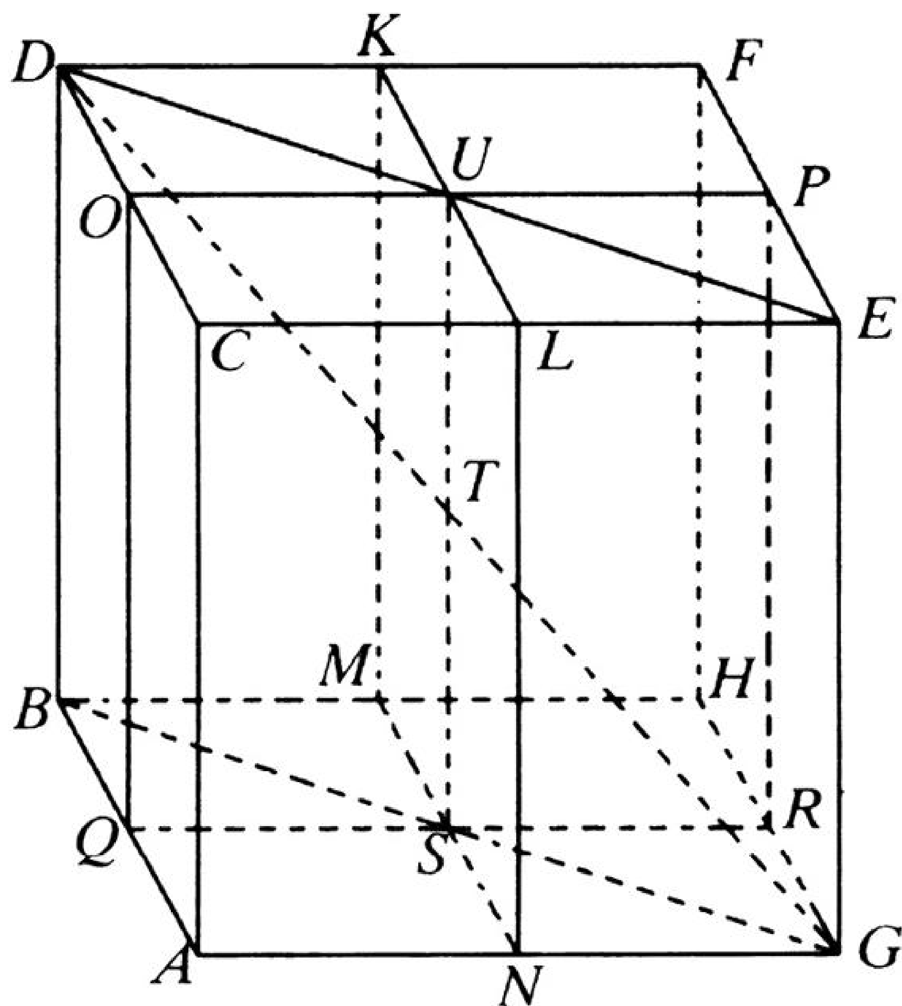
所以：*AB*比*CD*如同*EF*比*GH*。

证完。

命题38

…

假如一个立方体相对面的边被平分，经过分点作平面，那么这些平面的交线和立方体的对角线互相平分。



设：立体*AF*的两个对面*CF*、*AH*的各边被点*K*、*L*、*M*、*N*、*O*、*Q*、*P*、*R*所平分，通过分点作平面*KN*、*OR*。*US*是两面的交线，*DG*是立方体*AF*的对角线。

那么可以说：*UT*等于*TS*，*DT*等于*TG*。

设：连接*DU*、*UE*、*BS*、*SG*。

那么：*DO*平行于*PE*，

所以：内错角*DOU*、*UPE*彼此相等。[I. 29]

因为：*DO*等于*PE*，*OU*等于*UP*，且两边所夹的角相等，

所以：底*DU*等于底*UE*，三角形*DOU*全等于三角形*PUE*，其余的角等于其余的角，[I. 4]

因此：角*OUD*等于角*PUE*，

所以：*DUE*是一条直线。[I. 14]

同理：*BSG*也是一条直线，*BS*等于*SG*。

因为：*CA*等于且平行于*DB*，面*CA*等于且平行于*EG*，

所以：*DB*等于且平行于*EG*。[XI. 9]

设：连接它们端点的直线*DE*、*BG*，

因此：*DE*平行于*BG*。[I. 33]

因为：角*EDT*和角*BGT*都是内错角，

所以：角*EDT*等于角*BGT*。[I. 29]

因为：*DTU*等于角*GTS*，[I. 15]

所以：两三角形*DTU*和*GTS*有两角分别等于两角，有一边等于一边，也就是等角所对的一边。

因为：它们分别是*DE*、*BG*的一半，

因此：*DU*等于*GS*，[I. 26]

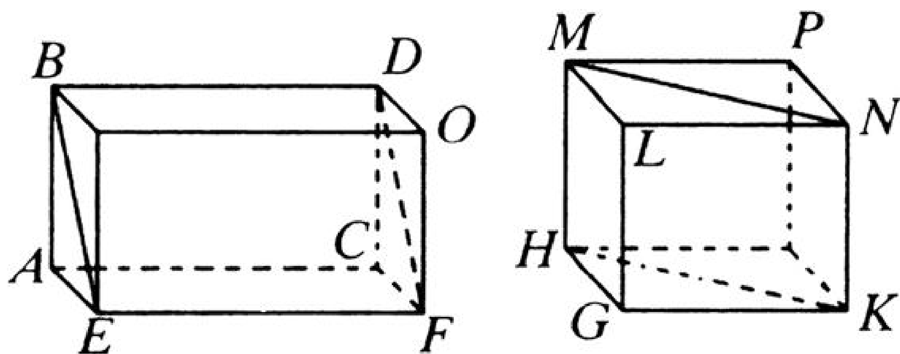
所以：*DT*等于*TG*，*UT*等于*TS*。

证完。

命题39

…

假如有两个等高的棱柱，分别以平行四边形和三角形为底，假如平行四边形是三角形的二倍，那么二棱柱相等。



设：*ABCDEF*、*GHKLMN*是两个等高的棱柱，一个底是平行四边形*AF*，另一底为三角形*GHK*，并且平行四边形*AF*等于三角形*GHK*的二倍。

那么可以说：棱柱*ABCDEF*等于棱柱*GHKLMN*。

完成立体*AO*、*GP*。

因为：平行四边形*AF*等于三角形*GHK*的二倍，平行四边形*HK*等于三角形*GHK*的二倍，[I. 34]

所以：平行四边形*AF*等于平行四边形*HK*。

因为：等底等高的二个平行六面体彼此相等，[XI. 31]

所以：立体*AO*等于立体*GP*。

因为：棱柱*ABCDEF*是立体*AO*的一半，棱柱*GHKLMN*是立体*GP*的一半，[XI. 28]

因此：棱柱*ABCDEF*等于棱柱*GHKLMN*。

证完。

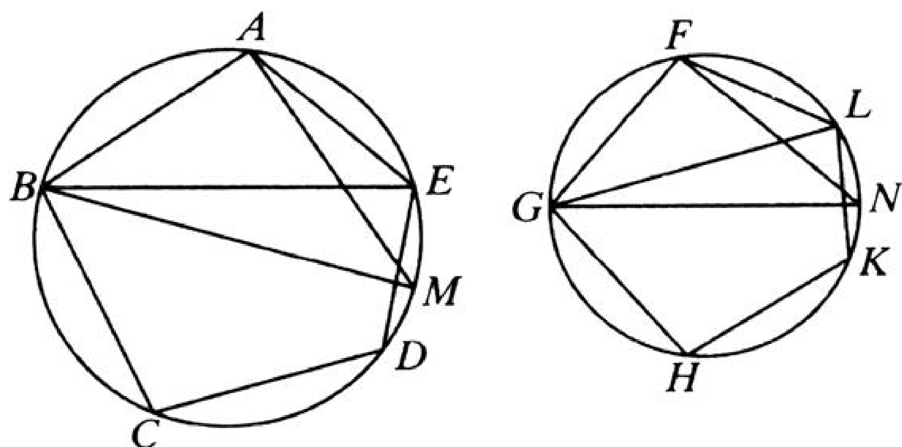
卷XII

命题

命题1

…

圆内接相似多边形之比如同圆直径上的正方形之比。



设：*ABC*、*FGH*是两个圆，

*ABCDE*和*FGHKL*是内接于圆的相似多边形，

并且*BM*、*GN*为圆的直径。

那么可以说：*BM*上的正方形比*GN*上的正方形如同多边形*ABCDE*比多边形*FGHKL*。

连接*BE*、*AM*、*GL*、*FN*。

因为：多边形*ABCDE*相似于多边形*FGHKL*，

所以：角*BAE*等于角*GFL*，并且*BA*比*AE*如同*GF*比*FL*，[VI. 定义1]

因此：两个三角形*BAE*、*GFL*有一个角等于另一个角，

也就是BAE等于角GFL，并且夹等角的边成比例，

所以：三角形ABE与三角形FGL是等角的，[VI. 6]

因此：角AEB等于角FLG。

因为：角AEB与角AMB在同一圆弧上，它们相等，[III. 27]

并且角FLG等于角FNG，

因此：角AMB等于角FNG。

因为：直角BAM等于直角GFN，[III. 31]

所以：其余的角等于其余的角，[I. 32]

因此：三角形ABM与三角形FGN是等角的，

那么，按比例：BM比GN如同BA比GF。[VI. 4]

因为：BM上的正方形与GN上的正方形的比如同BM与GN的二次比，并且多边形$ABCDE$比多边形$FGHKL$如同BA与GF的二次比，[VI. 20]

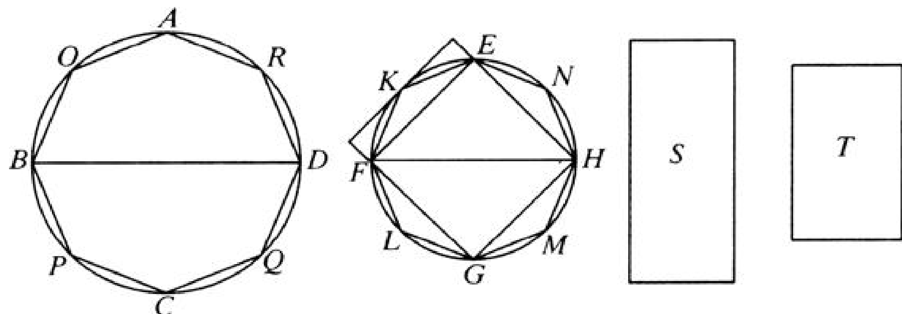
所以：BM上的正方形比GN上的正方形如同多边形$ABCDE$比多边形$FGHKL$。

证完。

命题2

…

圆与圆之比如同直径上的正方形之比。



设：*ABCD*、*EFGH*是两圆，并且*BD*、*FH*是它们的直径。

那么可以说：圆*ABCD*比圆*EFGH*如同*BD*上的正方形比*FH*上的正方形。

设：*BD*上的正方形比*FH*上的正方形不同于圆*ABCD*比圆*EFGH*。

那么：*BD*上的正方形比*FH*上的正方形等于圆*ABCD*比要么小于圆*EFGH*的面积，要么大于圆*EFGH*的面积。

先设：成比例的面积*S*小于圆*EFGH*。

而正方形*EFGH*内接于圆*EFGH*，内接正方形大于圆*EFGH*面积的一半，

所以：假如过点*E*、*F*、*G*、*H*作圆的切线，那么正方形*EFGH*等于圆外切正方形的一半，

并且圆小于外切正方形，

所以：内接正方形*EFGH*大于圆*EFGH*的一半。

设：二等分圆弧*EF*、*FG*、*GH*、*HE*，它们的分点为*K*、*L*、*M*、*N*，

连接*EK*、*KF*、*FL*、*LG*、*GM*、*MH*、*HN*、*NE*，

因此：三角形*EKF*、*FLG*、*GMN*、*HNE*的每一个大于三角形所在的弓形的一半，

所以：过点*K*、*L*、*M*、*N*作圆的切线且在线段*EF*、*FG*、*GH*、*HE*上

作平行四边形，

三角形*EKF*、*FLG*、*GMH*、*HNE*的每一个是所在平行四边形的一半。

又因：包含它的弓形小于它所在的平行四边形，

所以：三角形*EKF*、*FLG*、*GMH*、*HNE*大于它们所在弓形的一半，

那么：平分其余的圆弧，从分点作弦，如此继续下去，可以使得到的弓形的和小于圆*EFGH*超过面积*S*的部分，

这一点已由第十卷的第一定理所证明：如果有两个量不相等，那么从大量中每次减去大于一半的量，若干次后，所余的量必小于较小的量。

设：圆*EFGH*的*EK*、*KF*、*FL*、*LG*、*GM*、*MH*、*HN*、*NE*上的弓形的和小于圆与面积*S*的差，

因此：余下的多边形*EKFLGMHN*大于面积*S*。

设：有内接于圆*ABCD*的多边形*AOBPCQDR*相似于多边形*EKFLGMHN*，

因此：*BD*上的正方形比*FH*上的正方形如同多边形*AOBPCQDR*比多边形*EKFLGMHN*。[XII. 1]

因为：*BD*上的正方形比*FH*上的正方形也如同圆*ABCD*比面积*S*，

所以：圆*ABCD*比面积*S*如同多边形*AOBPCQDR*比多边形*EKFLGMHN*。[XII. 1]

因为：*BD*上的正方形比*FH*上的正方形也如同圆*ABCD*比面积*S*，

因此：圆*ABCD*比面积*S*如同多边形*AOBPCQDR*比多边形*EKFLGMHN*，[V. 11]

因此，由更比：圆*ABCD*比内接多边形如同面积*S*比多边形

EKFLGMHN，[V. 16]

因为：圆*ABCD*大于内接于它的多边形，

所以：面积*S*大于多边形*EKFLGMHN*。

又因：它小于多边形*EKFLGMHN*，

这是不符合实际的，

因此：*BD*上的正方形比*FH*上的正方形不同于圆*ABCD*比圆*EFGH*较小的面积。

同理可证：圆*EFGH*与一个小于圆*ABCD*的面积之比也不同于*FH*上的正方形与*BD*上的正方形之比。

接下来可以证明：圆*ABCD*与一个大于圆*EFGH*的面积之比也不同于*BD*上的正方形与*FH*上的正方形之比。

设：比例较大的面积是*S*。

由互反比例：*FH*上的正方形比*DB*上的正方形如同面积*S*比圆*ABCD*。

因为：面积*S*比圆*ABCD*如同圆*EFGH*比小于圆*ABCD*的某个面积，

因此：*FH*上的正方形比*BD*上的正方形如同圆*EFGH*比小于圆*ABCD*的某个面积，[V. 11]

已经证明：这是不符合实际的，

因此：*BD*上的正方形比*FH*上的正方形不同于圆*ABCD*比大于圆*EFGH*的某个面积。

又因，已经证明：成比例的小于圆*EFGH*的面积是不存在的，

因此：*BD*上的正方形比*FH*上的正方形如同圆*ABCD*比圆*EFGH*。

证完。

引理

…

假如面积S大于圆$EFGH$，那么可以说面积S比圆$ABCD$如同圆$EFGH$比小于圆$ABCD$的某个面积。

设：已知面积S比圆$ABCD$如同圆$EFGH$比面积T。

那么可以说：面积T小于圆$ABCD$。

因为：面积S比圆$ABCD$如同圆$EFGH$比面积T，

由更比：面积S比圆$EFGH$等于圆$ABCD$比面积T。[V. 16]

因为：面积S大于圆$EFGH$，

因此：圆$ABCD$大于面积T，

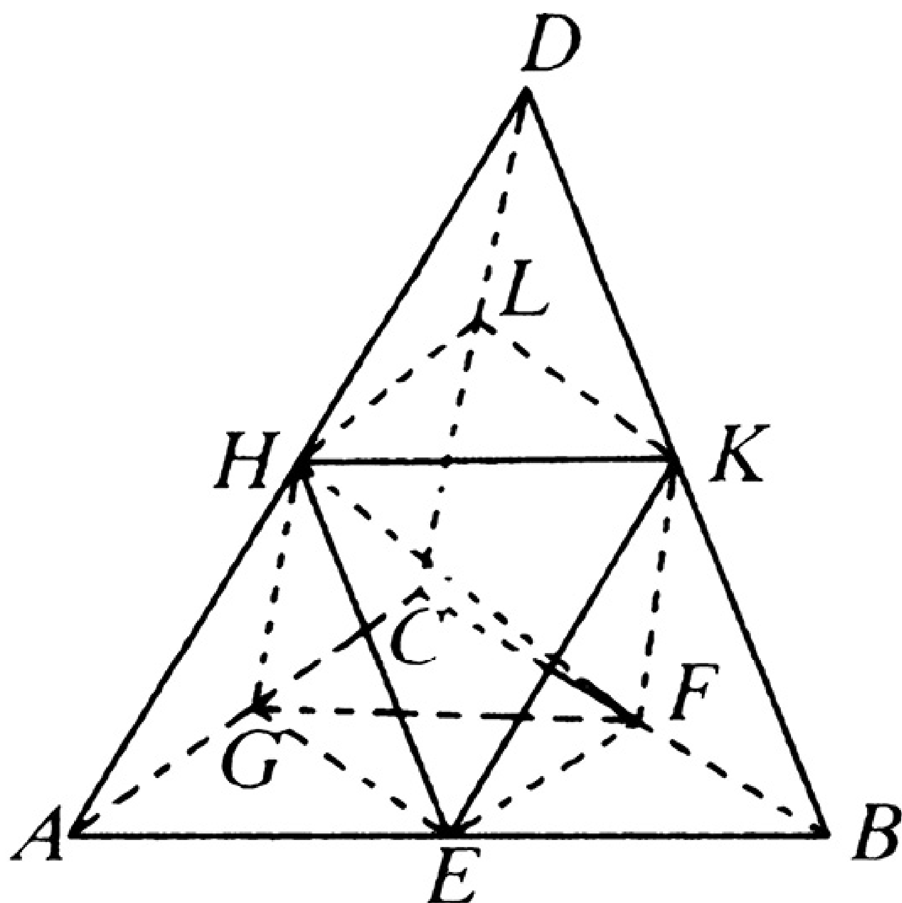
所以：面积S比圆$ABCD$如同圆$EFGH$比小于圆$ABCD$的某个面积。

证完。

命题3

…

任何一个以三角形为底的棱锥可以被分为两个相等且与原棱锥相似又以三角形为底的三棱锥，以及其和大于原棱锥一半的两个相等的棱柱。



设：有一个以三角形*ABC*为底且以点*D*为顶点的棱锥。

那么可以说：棱锥*ABCD*可被分为相等且相似的以三角形为底的棱锥，并与原棱锥相似，它们的和大于原棱锥一半的两个相等的棱柱。

设：平分*AB*、*BC*、*CA*、*AD*、*DB*、*DC*，它们的分点为*E*、*F*、*G*、*H*、*K*、*L*，

连接*HE*、*EG*、*GH*、*HK*、*KL*、*LH*、*KF*、*FG*。

因为：*AE*等于*EB*，并且*AH*等于*DH*，

因此：*EH*平行于*DB*。[VI. 2]

同理：*HE*平行于*AB*，

所以：*HEBK*为平行四边形，而*HK*等于*EB*。[I. 34]

因为：*EB*等于*EA*，

因此：*AE*等于*HK*。

因为：*AH*等于*HD*，

所以：两边*EA*、*AH*分别等于两边*KH*、*HD*，角*EAH*等于角*KHD*，

所以：底*EH*等于底*KD*，[I. 4]

因此：三角形*AEH*等于且相似于三角形*HKD*。

同理：三角形*AHG*等于且相似于三角形*HLD*。

因为：彼此相交的两直线*EH*、*HG*平行于彼此相交的两直线*KD*、*DL*，且不在同一平面上，那么它们所夹的角相等，[XI. 10]

所以：角*EHG*等于角*KDL*。

因为：两线段*EH*、*HG*分别等于*KD*、*DL*，角*EHG*等于角*KDL*，

所以：底*EG*等于底KL，[I. 4]

因此：三角形*EHG*相等且相似于三角形*KDL*。

同理：三角形*AEG*也相等且相似于三角形*HEL*，

那么：以三角形*AEG*为底，以点*H*为顶点的棱锥等于且相似于以三角形*HKL*为底且以*D*为顶点的棱锥。[XI. 定义10]

因为：*HK*平行于三角形*ADB*的一边*AB*，

所以：三角形*ADB*与三角形*DHK*是等角的。[I. 29]

因为：它们的边成比例，

因此：三角形*ADB*相似于三角形*DHK*。[VI. 定义1]

同理：三角形*DBC*相似于三角形*DKL*，以及三角形*ADC*相似于三角形*DLH*。

因为：彼此相交的两直线*BA*、*AC*分别平行于彼此相交的两直线*KH*、*HL*，

并且它们不在同一平面上，

所以：它们所夹的角相等，[XI. 10]

因此：角*BAC*等于角*KHL*。

因为：*BA*比*AC*如同*KH*比*HL*，

因此：三角形*ABC*相似于三角形*HKL*，

所以：以三角形*ABC*为底且以点*D*为顶点的棱锥相似于以三角形*HKL*为底且以点*D*为顶点的棱锥。

又因，已经证明：以三角形*HKL*为底且以点*D*为顶点的棱锥相似于以三角形*AEG*为底且以点*H*为顶点的棱锥，

因此：棱锥*AEGH*、*HKLD*的每一个都相似于棱锥*ABCD*。

因为：*BF*等于*FC*，平行四边形*EBFG*等于二倍的三角形*GFC*，

且倘若分别有平行四边形和三角形为底的两个等高的棱柱，并且平行四边形是三角形的二倍，那么二棱柱相等，[XI. 39]

所以：由三角形*BKF*、*EHG*及三个平行四边形*EBFG*、*EBKH*、*HKFG*围成的棱柱等于由三角形*GFC*、*HKL*和三个平行四边形*KFCL*、*LCGH*、*HKFG*围成的棱柱，

所以：棱柱的每一个，也就是以平行四边形*EBFG*为底且以线段*HK*为对棱的棱柱与以三角形*GFC*为底且以三角形*HKL*为对面的棱柱都大于以三角形*AEG*、*HKL*为底且以*H*、*D*为顶点的棱锥。

因为：倘若连接线段*EF*、*EK*，那么以平行四边形*EBFG*为底且以*HK*

为对棱的棱柱大于以三角形EBF为底且以K为顶点的棱锥，

因为：以三角形EBF为底且以点K为顶点的棱锥与以三角形AEG为底且以H为顶点的棱锥，是由相似且相等的面组成，

所以：它们相等，

所以：以平行四边形$EBFG$为底且以线段HK为棱的棱柱大于以三角形AEG为底且以点H为顶点的棱锥。

因为：以平行四边形$EBFG$为底，以线段HK为对棱的棱柱等于以三角形GFC为底且以三角形HKL为对面的棱柱，以三角形AEG为底且以点H为顶点的棱锥等于以三角形HKL为底且以点D为顶点的棱锥，

因此：两个棱柱的和大于分别以三角形AEG、HKL为底且以H、D为顶点的棱锥的和，

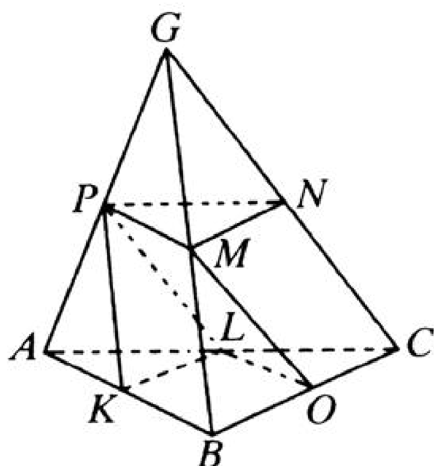
因此：以三角形ABC为底且以点D为顶点的整体棱锥已被分为两个彼此相等的棱锥和两个相等的棱柱，并且两个棱柱的和大于整个棱锥的一半。

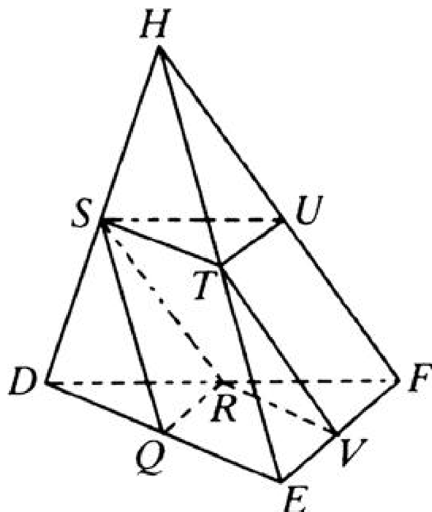
证完。

命题4

…

假如有以三角形为底且有等高的两个棱锥，又各分为相似于原棱锥的两个相等的棱锥和两个相等的棱柱，那么一个棱锥的底比另一个棱锥的底如同一个棱锥内所有棱柱的和比另一个棱锥内同样个数的所有棱柱的和。





设：有等高且以三角形*ABC*、*DEF*为底，以*G*、*H*为顶点的两棱锥，

并且它们都被分为两个相似于原棱锥的两个相等的棱锥和两个相等的棱柱。[XII. 3]

那么可以说：底*ABC*比底*DEF*如同棱锥*ABCG*内所有棱柱的和比棱锥*DEFH*内同样个数的棱柱的和。

因为：*BO*等于*OC*，且*AL*等于*LC*，

因此：*LO*平行于*AB*，三角形*ABC*相似于三角形*LOC*。

同理：三角形*DEF*相似于三角形*RVF*。

因为：*BC*等于*CO*的二倍，*EF*等于*FV*的二倍，

因此：*BC*比*CO*如同*EF*比*FV*。

在*BC*、*CO*上作两个相似且有相似位置的直线形*ABC*、*LOC*；

在*EF*、*FV*上作两个相似且有相似位置的直线形*DEF*、*RVF*，

因此：三角形*ABC*比三角形*LOC*如同三角形*DEF*比三角形*RVF*，[VI. 22]

那么，由更比：三角形*ABC*比三角形*DEF*如同三角形*LOC*比三角形

RVF。[V. 16]

又因：三角形*LOC*比三角形*RVF*如同以三角形*LOC*为底且以三角形*PMN*为对面的棱柱比以三角形*RVF*为底且以*STU*为对面的棱柱，[后面的引理]

因此：三角形*ABC*比三角形*DEF*如同以三角形*LOC*为底且以*PMN*为对面的棱柱比以三角形*RVF*为底以*STU*为对面的棱柱。

因为：棱柱之比如同以平行四边形*KBOL*为底且以线段*PM*为对棱的棱柱比以平行四边形*QEVR*为底且以线段*ST*为对棱的棱柱，[XI. 39，参看XII. 3]

因此：这两个棱柱相比，以平行四边形*KBOL*为底且以*PM*为对棱的棱柱及以三角形*LOC*为底且以*PMN*为对面的棱柱的和，与以*QEVR*为底且以线段*ST*为对棱的棱柱及以三角形*RVF*为底且以*STU*为对面的棱柱的和的比相同，[V. 12]

因此：底*ABC*比底*DEF*如同上述两个棱柱的和比两个棱柱的和。

同理：假如两棱柱*PMNG*、*STUH*被分为两个棱柱和两个棱锥，

那么：底*PMN*比底*STU*如同棱锥*PMNG*内两棱柱的和比棱锥*STUH*内两棱柱的和。

因为：三角形*PMN*、*STU*分别等于三角形*LOC*和*RVF*，

所以：底*PMN*比底*STU*如同底*ABC*比底*DEF*，

因此：底*ABC*比底*DEF*如同四个棱柱比四个棱柱。

同理：假如再分余下的棱锥为两个棱锥和两个棱柱，

那么：底*ABC*比底*DEF*如同棱锥*ABCG*内所有棱柱的和比棱锥*DEFH*内所有个数相同的棱柱的和。

证完。

引理

…

三角形LOC比三角形RVF如同以三角形LOC为底且以PMN为对面的棱柱比以三角形RVF为底，并且以STU为对面的棱柱。[XI. 17]

在上图中，从点G、H向平面ABC、DEF作垂线，并且两垂线相等，

根据假设：两棱锥有相等的高。

因为：线段GC和从G点所作垂线被两平行平面ABC、PMN所截，

它们被截成有相同比的线段。[XI. 17]

因为：平面PMN平分CG于点N，

所以：从G到平面ABC的垂线也被平面PMN所平分。

同理：从点H到平面DEF的垂线也被平面STU所平分。

因为：从点G、H到平面ABC、DEF的垂线相等，

因此：从三角形PMN、STU到平面ABC、DEF的垂线也相等，

所以：以三角形LOC、RVF为底且以PMN、STU为对面的两棱柱等高，

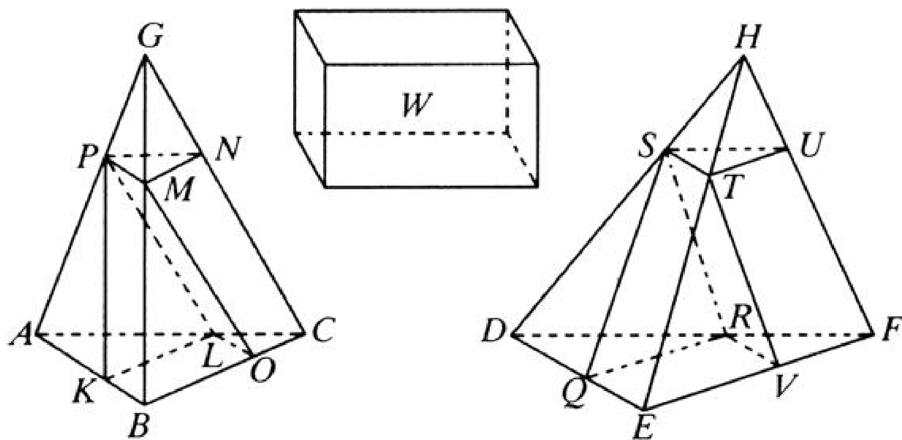
所以：由上述两棱柱构成的等高的两平行六面体的比如同它们的底的比，[X. 32]

因此：它们的一半，也就是上述两棱柱互比，如同底LOC比底RVF。

证完。

命题5

以三角形为底且有等高的两个棱锥的比如同两底的比。



设：已知以三角形*ABC*、*DEF*为底，以点*G*、*H*为顶点的等高的棱锥。

那么可以说：底*ABC*比底*DEF*如同棱锥*ABCG*比棱锥*DEFH*。

因为：倘若棱锥*ABCG*比棱锥*DEFH*不同于底*ABC*比底*DEF*，

那么：底*ABC*比底*DEF*如同棱锥*ABCG*比某个小于或大于棱锥*DEFH*的立体。

先设：按照第一种情况，成比例的是一个较小的立体*W*，将棱锥*DEFH*分为两个相似于原棱锥的相等棱锥和两个相等的棱柱，

并且两棱柱的和大于原棱锥的一半。[XII. 3]

同理：再分所得的棱锥，如此下去，直至棱锥*DEFH*得到某些小于棱锥*DEFH*与立体*W*的差的棱锥。[X. 1]

设：所要得到的棱锥是*DQRS*、*STUH*，

因此：在棱锥*DEFH*内剩下的棱柱的和大于立体*W*。

同理：也和分棱锥*DEFH*的次数相仿去分棱锥*ABCG*，

因此：底ABC比底DEF也如同棱锥$ABCG$内棱柱的和比棱锥$DEFH$中棱柱的和。[XII. 4]

因为：底ABC比底DEF也如同棱锥$ABCG$比立体W，

所以：棱锥$ABCG$比立体W如同棱锥$ABCG$中棱柱的和比棱锥$DEFH$中棱柱的和，[V. 11]

因此，由更比：棱锥$ABCG$比它中棱柱的和如同立体W比棱锥$DEFH$中棱柱的和。[V. 16]

因为：棱锥$ABCG$大于它中所有棱柱的和，

因此：立体W大于棱锥$DEFH$中所有棱柱的和。

但是它小于，

这是不符合实际的，

因此：棱锥$ABCG$比小于棱锥$DEFH$的立体不同于底ABC比底DEF。

同理可证：棱锥$DEFH$比小于棱柱$ABCG$的任何立体不同于底DEF比底ABC。

接下来可以证明：不可能有，棱锥$ABCG$比一个大于棱锥$DEFH$的立体如同底ABC比底DEF。

这是因为，倘若可能，设：它与较大的立体W有这样的比，

因此，由反比：底DEF比底ABC如同立体W比棱锥$ABCG$。

又因，已经证明：立体W比立体$ABCG$如同棱锥$DEFH$比小于棱锥$ABCG$的某个立体，[XII. 2，引理]

因此：底DEF比底ABC也如同棱锥$DEFH$比小于棱锥$ABCG$的某个立体。[V. 11]

已经证明：这是不符合实际的，

因此：棱锥*ABCG*比大于棱锥*DEFH*的某个立体不同于底*ABC*比底*DEF*。

又因，已经证明：比小于的某个立体也是不行的，

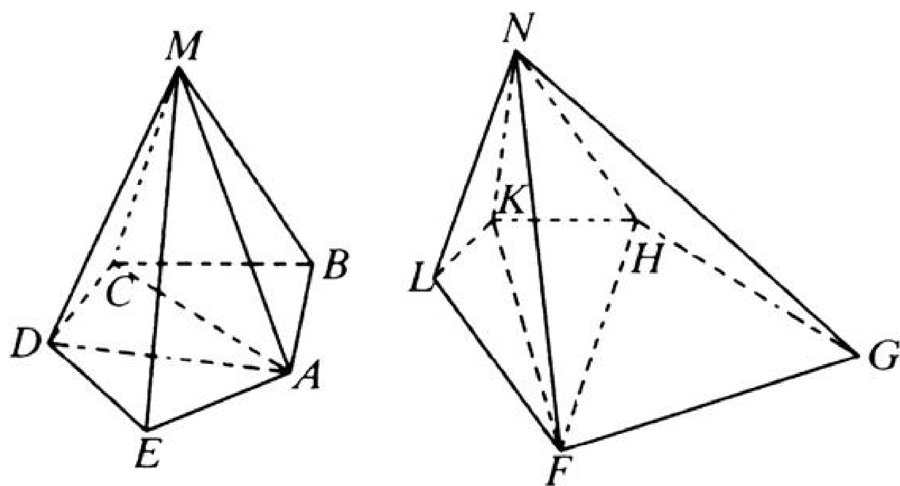
因此：底*ABC*比底*DEF*如同棱锥*ABCG*比棱锥*DEFH*。

证完。

命题6

…

以多边形为底且有等高的两个棱锥的比如同两底的比。



设：等高的两棱锥以多边形*ABCDE*、*FGHKL*为底且以点*M*、*N*为顶点。

那么可以说：底*ABCDE*比底*FGHKL*，又如同棱锥*ABCDEM*比棱锥*FGHKLN*。

连接*AC*、*AD*、*FH*、*FK*。

因为：*ABCM*、*ACDM*是以三角形为底且有等高的两个棱锥，它们的比如同两底之比，[XII. 5]

因此：底*ABC*比底*ACD*如同棱锥*ABCM*比棱锥*ACDM*，

由合比：底*ABCD*比底*ACD*如同棱锥*ABCDM*比棱锥*ACDM*。[V. 18]

因为：底*ACD*比底*ADE*如同棱锥*ACDM*比棱锥*ADEM*，[XII. 5]

因此，由首末比：底*ABCD*比底*ADE*如同棱锥*ABCDM*比棱锥*ADEM*，[V. 22]

由合比：底*ABCDE*比底*ADE*如同棱锥*ABCDEM*比棱锥*ADEM*。[V. 18]

同理可证：底*FGHKL*比底*FGH*如同棱锥*FGHKLN*比棱锥*FGHN*。

因为：*ADEM*、*FGHN*是以三角形为底且有等高的两个棱锥，

所以：底*ADE*比底*FGH*又如同棱锥*ADEM*比棱锥*FGHN*。[XII. 5]

因为：底*ADE*比底*ABCDE*如同棱锥*ADEM*比棱锥*ABCDEM*，

因此，由首末比：底*ABCDE*比底*FGH*如同棱锥*ABCDEM*比棱锥*FGHN*。[V. 22]

又因：底*FGH*比底*FGHKL*也如同棱锥*FGHN*比棱锥*FGHKLN*，

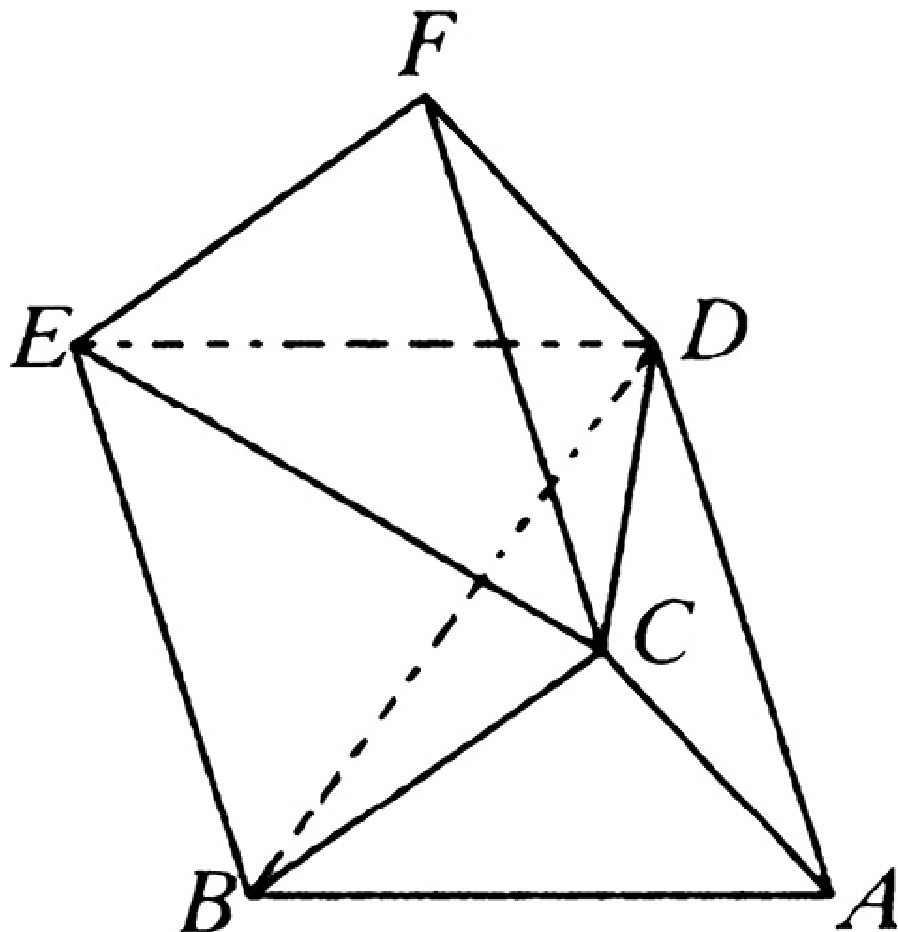
因此，由首末比：底*ABCDE*比底*FGHKL*如同棱锥*ABCDEM*比棱锥*FGHKLN*。[V. 22]

证完。

命题7

…

任何一个以三角形为底的棱柱可以被分为以三角形为底的三个彼此相等的棱锥。



设：有一个以三角形*ABC*为底且其对面为三角形*DEF*的棱柱。

那么可以说：棱柱*ABCDEF*可被分为三个彼此相等的以三角形为底的棱锥。

连接*BD*、*EC*、*CD*。

因为：*ABED*是平行四边形，*BD*是它的对角线，

因此：三角形*ABD*全等于三角形*EBD*。[I. 34]

那么：以三角形*ABD*为底且以*C*为顶点的棱锥等于以三角形*DEB*为底且以*C*为顶点的棱锥。[XII. 5]

因为：以三角形*DEB*为底且以*C*为顶点的棱锥与以三角形*EBC*为底且

以*D*为顶点的棱锥是由相同面围成的，

因此：它们是一样的，

所以：以三角形*ABD*为底且以*C*为顶点的棱锥等于以三角形*EBC*为底且以*D*为顶点的棱锥。

因为：*FCBE*是平行四边形，*CE*是它的对角线，三角形*CEF*全等于三角形*CBE*，[I. 34]

所以：以三角形*BCE*为底且以*D*为顶点的棱锥等于以*ECF*为底且以*D*为顶点的棱锥。[XII. 5]

又因，已经证明：以三角形*BCE*为底且以*D*为顶点的棱锥等于以三角形*ABD*为底以*C*为顶点的棱锥，

因此：以三角形*CEF*为底以*D*为顶点的棱锥等于以三角形*ABD*为底且以*C*为顶点的棱锥，

所以：棱柱*ABCDEF*已被分成三个相等的以三角形为底的棱锥。

因为：以三角形*ABD*为底且以*C*为顶点的棱锥与以三角形*CAB*为底且以*D*为顶点的棱锥是由相同平面围成的，

因此：它们是相同的。

又因，已经证明：以三角形*ABD*为底，以*C*为顶点的棱锥等于以三角形*ABC*为底且以*DEF*为对面的棱柱的三分之一，

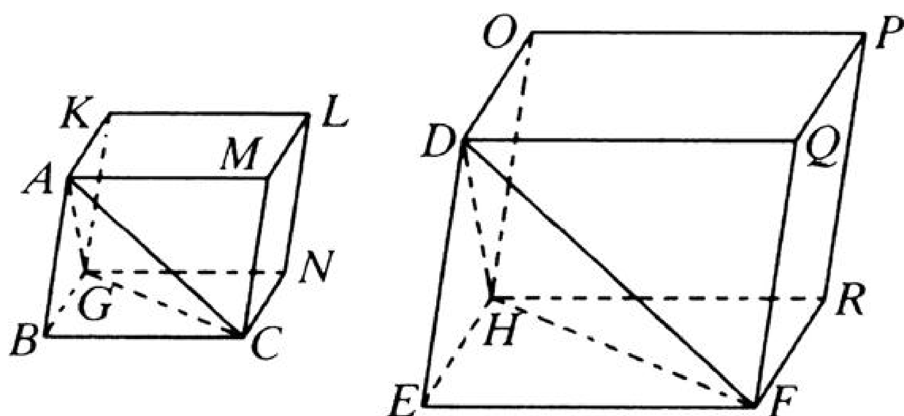
因此：以*ABC*为底以*D*为顶点的棱锥等于以相同的三角形*ABC*为底且以*DEF*为对面的棱柱的三分之一。

证完。

推论 任何棱锥都等于和它同底等高的棱柱的三分之一。

命题8

以三角形为底的相似棱锥的比如同它们对应边的三次比。



设：有分别以*ABC*、*DEF*为底，以点*G*、*H*为顶点的两个相似且有相似位置的棱锥。

那么可以说：*ABCG*与*DEFH*的比如同*BC*与*EF*的三次比。

设：有平行六面体*BGML*与*EHQP*，

因为：棱锥*ABCG*相似于棱锥*DEFH*，

所以：角*ABC*等于角*DEF*，角*GBC*等于角*HEF*，并且角*ABG*等于角*DEH*。

因为：*AB*比*DE*如同*BC*比*EF*，又如同*BG*比*EH*，

且*AB*比*DF*如同*BC*比*EF*，并且夹等角的边成比例，

所以：平行四边形*BM*相似于平行四边形*EQ*。

同理：*BN*相似于*ER*，而*BK*相似于*EO*，

所以：三个平行四边形*MB*、*BK*、*BN*相似于三个平行四边形*EQ*、*EO*、*ER*。

因为：三个平行四边形*MB*、*BK*、*BN*等于且相似于它们的三个对

面，并且三个面*EQ*、*EO*、*ER*相等且相似于它们的对面，[XI. 24]

因此：立体*BGML*、*EHQP*由同样多的相似面围成，

所以：立体*BGML*相似于立体*EHQP*。

因为：相似平行六面体的比如同对应边的三次比，[XI. 33]

因此：立体*BGML*与立体*EHQP*的比如同对应边*BC*与边*EF*的三次比。

又因：棱锥是平行六面体的六分之一，棱柱是平行六面体的一半，

因此：立体*BGML*比立体*EHQP*如同棱锥*ABCG*比棱锥*DEFH*。[XI. 28]

因为：它又是棱锥的三倍，

因此：棱锥*ABCG*与棱锥*DEFH*的比如同它们对应边*BC*与*EF*的三次比。

证完。

推论 由以上表明，以多边形为底的棱锥与以相似多边形为底的棱锥的比如同它们对应边的三次比。

因为：假如把它们分为以三角形为底的棱锥，把以相似多边形为底的也分为同样个数彼此相似的三角形，各对应三角形之比如同整体之比，[VI. 20]

因此：两棱锥内各对应的以三角形为底的棱锥的比如同二棱锥内以三角形为底的所有棱锥和的比，[V. 12]

也就是以原多边形为底的棱锥之比。

又因：以三角形为底的棱锥比以三角形为底的棱锥如同它们对应边的三次比，

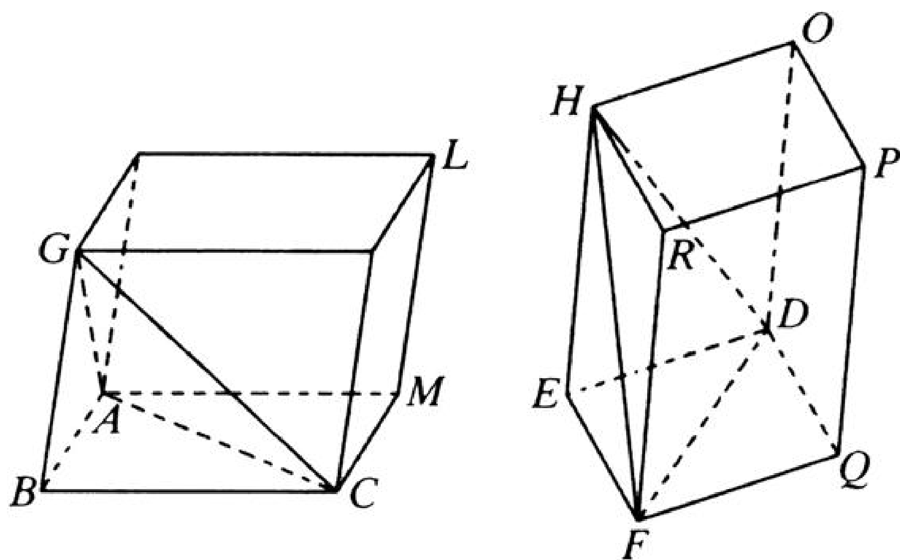
所以：以多边形为底的棱锥与以相似多边形为底的棱锥的比如同它们对应边的三次比。

证完。

命题9

…

以三角形为底且相等的棱锥，它的底和高成反比例；或者底和高成反比例的棱锥是相等的。



设：有以三角形*ABC*、*DEF*为底，以*G*、*H*为顶点的两个相等的棱锥。

那么可以说：在棱锥*ABCG*、*DEFH*中两底与高成反比例，

也就是底*ABC*比底*DEF*如同棱锥*DEFH*的高比棱锥*ABCG*的高。

作出平行六面体*BGML*、*EHQP*。

因为：棱锥*ABCG*等于棱锥*DEFH*，立体*BGML*等于六倍的棱锥*ABCG*，立体*EHQP*等于六倍的棱锥*DEFH*，

因此：立体$BGML$等于立体$EHQP$。

因为：在相等的平行六面体中，它们的底和高成反比例，[XI. 34]

所以：底BM比底EQ如同立体$EHQP$的高比立体$BGML$的高。

因为：底BM比EQ如同三角形ABC比三角形DEF，[I. 34]

所以：三角形ABC比三角形DEF如同立体$EHQP$的高比立体$BGML$的高。[V. 11]

因为：立体$EHQP$的高与棱锥$DEFH$的高相等，并且立体$BGML$的高与棱锥$ABCG$的高相等，

因此：底ABC比底DEF如同棱锥$DEFH$的高比棱锥$ABCG$的高，

所以：棱锥$ABCG$与$DEFH$的底与高成反比例。

又设：棱锥$ABCG$与$DEFH$的底和高成反比例，也就是底ABC比底DEF如同棱锥$DEFH$的高比棱锥$ABCG$的高，

那么可以说：$ABCG$等于棱锥$DEFH$。

用相同的构图。

因为：底ABC比底DEF如同棱锥$DEFH$的高比棱锥$ABCG$的高，

且底ABC比底DEF如同平行四边形BM比平行四边形EQ，

所以：平行四边形BM比平行四边形EQ如同棱锥$DEFH$的高比棱锥$ABCG$的高。[V. 11]

因为：棱锥$DEFH$的高与平行六面体$EHQP$的高相等，棱锥$ABCG$的高与平行六面体$BGML$的高相等，

所以：底BM比底EQ如同平行六面体$EHQP$的高比平行六面体$BGML$的高。

因为：在底和高成反比例时，平行六面体相等，[XI. 34]

所以：平行六面体*BGML*等于平行六面体*EHQP*。

因为：棱锥*ABCG*等于*BGML*的六分之一，棱锥*DEFH*等于平行六面体*EHQP*的六分之一，

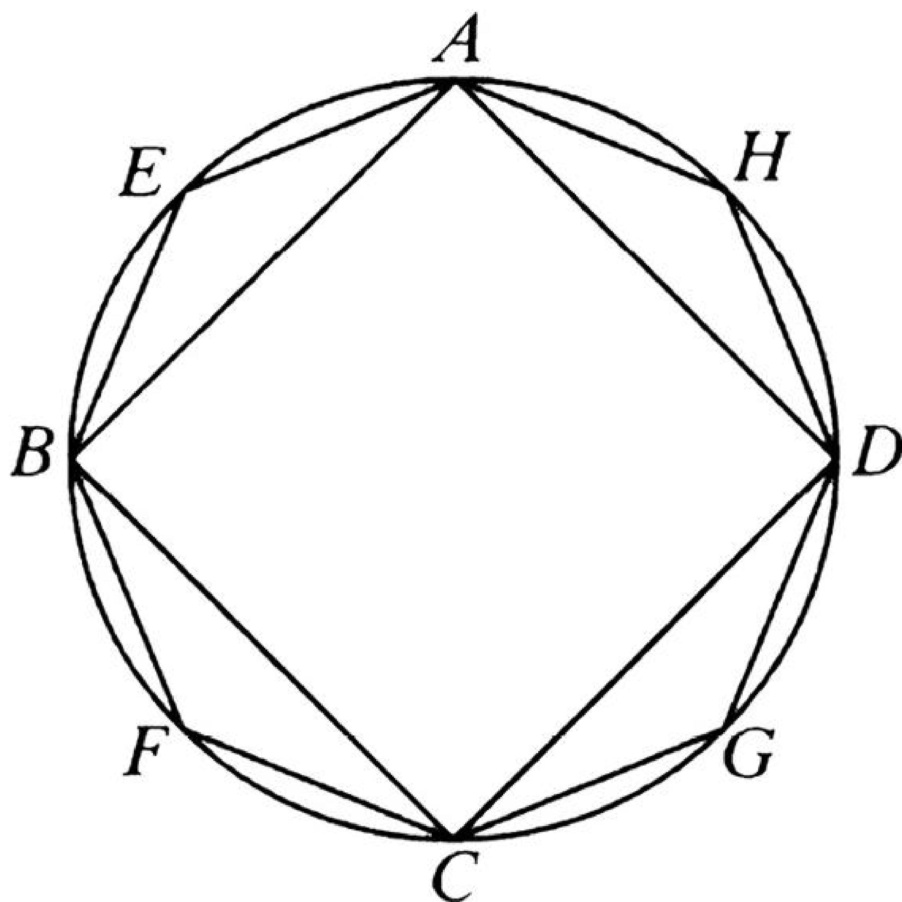
因此：棱锥*ABCG*等于棱锥*DEFH*。

证完。

命题10

…

任一圆锥是与它同底等高的圆柱的三分之一。



设：一个圆锥和圆柱同底，也就是圆$ABCD$，它们有相等的高。

那么可以说：圆锥为圆柱的三分之一，也就是圆柱为圆锥的三倍。

假如：圆柱不是圆锥的三倍，那么圆柱要么大于圆锥的三倍，要么小于圆锥的三倍。

先设：它大于圆锥的三倍，正方形$ABCD$内接于圆$ABCD$。[IV. 6]

那么：正方形$ABCD$大于圆$ABCD$的一半，

在正方形$ABCD$上作一个和圆柱等高的棱柱，

因为：假如作圆$ABCD$的外切正方形，那么圆$ABCD$的内接正方形是圆外切正方形的一半，与在它们上作的平行六面体的棱柱等高，

因此：这个棱柱大于圆柱的一半。[IV. 7]

因为：等高的平行六面体之比如同它们底之比，[XI. 32]

所以：正方形$ABCD$上的棱柱是圆$ABCD$外切正方形上棱柱的一半。[参阅XI. 28. 或XII. 6和7. 推论]

因为：圆柱小于圆$ABCD$外切正方形上的棱柱，

所以：同圆柱等高的正方形$ABCD$上的棱柱大于圆柱的一半。

二等分弧AB、BC、CD、DA于E、F、G、H，且连接AE、EB、BF、FC、CG、GD、DH、HA。

已经证明：三角形AEB、BFC、CGD、DHA的每一个都大于圆$ABCD$的弓形的一半，[XII. 2]

在三角形AEB、BFC、CGD、DHA每一个上作与圆柱等高的棱柱，

那么：棱柱的每一个大于包含它的弓形柱的一半。

因为：假如过点E、F、G、H作AB、BC、CD、DA的平行线，

又由它们作平行四边形，在其上作与圆柱等高的平行六面体，在三角形*AEB*、*BFC*、*CGD*、*DHA*上的棱柱是各个立体的一半，并且弓形圆柱的和小于平行六面体的和，

因此：三角形*AEB*、*BFC*、*CGD*、*DHA*上棱柱的和大于包含它们的弓形柱的和的一半，

所以：二等分余下的弧，连接其分点，在每个三角形上作与圆柱等高的棱柱，继续作下去，从而得到一些弓形圆柱的和小于圆柱超过三倍圆锥的部分。[X. 1]

又设：得到一些弓形柱，这些弓形柱是*AE*、*EB*、*BF*、*FC*、*CG*、*GD*、*DH*、*HA*，

所以：以多边形*AEBFCGDH*为底且其高与圆柱的高相等的棱柱大于圆锥的三倍。

因为：与圆柱高相同且以多边形*AEBFCGDH*为底的棱柱三倍于以多边形*AEBFCGDH*为底且和圆锥有同一顶点的棱锥，[XII. 7，推论]

因此：以多边形*AEBFCGDH*为底且和圆锥有同一顶点的棱锥大于以圆*ABCD*为底的圆锥。

又因：它小于此圆锥，

并且圆锥包含棱锥，

这是不符合实际的，

因此：圆柱不大于圆锥的三倍。

接下来可以证明：圆柱也不小于圆锥的三倍。

设：圆柱小于圆锥的三倍，

因此：反之，圆锥大于圆柱的三分之一。

设：正方形*ABCD*内接于圆*ABCD*，

那么：正方形$ABCD$大于圆$ABCD$一半。

设：在正方形$ABCD$上作一个顶点和圆锥顶点相同的棱锥，

因此：此棱锥大于圆锥的一半。

已经证明：假如作圆的外切正方形，

那么：正方形$ABCD$是圆外切正方形的一半，

并且，倘若从正方形上作与圆锥等高的平行六面体，也叫作棱柱，

所以：正方形$ABCD$上的棱柱与圆外切正方形上的棱柱的比如同它们底的比，

因此：正方形$ABCD$上的棱柱是圆外切正方形上棱柱的一半，[XI. 32]

所以：它们的三分之一相比也如同这个比，

因而：以正方形$ABCD$为底的棱锥是圆外切正方形上棱锥的一半。

因为：圆外切正方形上的棱锥大于圆锥，

且圆外切正方形上的棱锥包含圆锥，

因此：正方形$ABCD$上的棱锥大于具有同一顶点的圆锥的一半。

设：用点E、F、G、H平分AB、BC、CD、DA弧，连接AE、EB、BF、FC、CG、GD、DH、HA，

所以：三角形AEB、BFC、CGD，DHA的每一个大于圆$ABCD$上包含它的弓形的一半。

因为：在三角形AEB、BFC、CGD、DHA每一个上作与圆锥有同一顶点的棱锥，

所以：每一个棱锥大于包含它的弓形圆锥的一半。

设：再平分圆弧，连接分点，在每一个三角形上作与圆锥有相同顶点的棱锥，继续作下去，

那么：可以得到一些弓形圆锥之和小于圆锥超过圆柱三分之一的部分。[X. 1]

设：已知*AE*、*EB*、*BF*、*FC*、*CG*、*GD*、*DH*、*HA*上的弓形柱，

那么：以多边形*AEBFCGDH*为底且与圆锥的顶点相同的棱锥大于圆柱的三分之一。

因为：以多边形*AEBFCGDH*为底与圆锥顶点相同的棱锥是以多边形*AEBFCGDH*为底且与圆柱同高的棱柱的三分之一，

所以：以多边形*AEBFCGDH*为底且与圆柱等高的棱柱大于以圆*ABCD*为底的圆柱。

因为：圆柱包含棱柱，

所以：棱柱小于圆柱，

这是不符合实际的，

因此：圆柱不小于圆锥的三倍。

又已经证明：圆柱不大于圆锥的三倍，

因此：圆柱是圆锥的三倍，

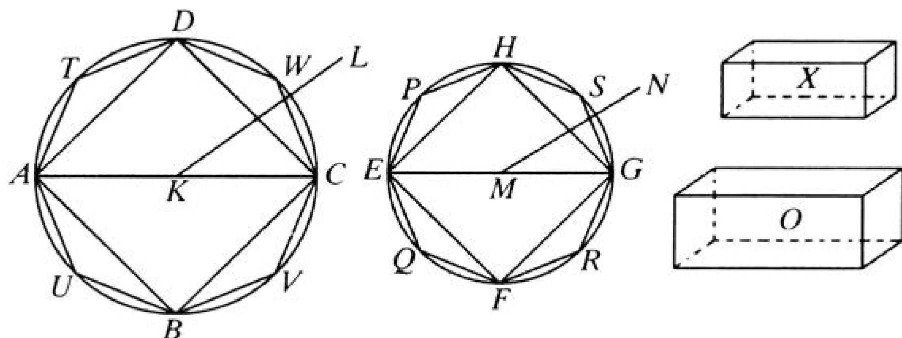
所以：圆锥是圆柱的三分之一。

证完。

命题11

…

等高的圆锥或等高的圆柱之比如同它们底的比。



设：已知等高的圆锥和圆柱，以圆*ABCD*、*EFGH*为它们的底，*KL*、*MN*是它们的轴，且*AC*、*EG*是它们底的直径。

那么可以说：圆*ABCD*比圆*EFGH*如同圆锥*AL*比圆锥*EN*。

设：如果不是这样，那么圆*ABCD*比圆*EFGH*如同圆锥*AL*与小于圆锥*EN*的某一立体之比或是大于圆锥*EN*的某一立体之比。

设：符合此比的是一个较小的立体*O*，立体X等于圆锥*EN*与较小的立体*O*的差，

因此：圆锥*EN*等于立体*O*与*X*的和。

设：正方形*EFGH*内接于圆*EFGH*，

因此：正方形大于圆的一半。

设：在正方形*EFGH*上作与圆锥等高的棱锥，

因此：这棱锥大于圆锥的一半。

因为：假如作圆的外切正方形，在它上作与圆锥等高的棱锥，

且内接棱锥与外接棱锥的比如同它们底的比，

因此：内接棱锥是外切棱锥的一半，[XII. 6]

所以：此圆锥小于外切棱锥。

用点*P*、*Q*、*R*、*S*等分圆弧*HE*、*EF*、*FG*、*GH*，

连接*HP*、*PE*、*EQ*、*QF*、*FR*、*RG*、*GS*、*SH*，

所以：三角形*HPE*、*EQF*、*FRG*、*GSH*的每一个都大于包含它的弓形的一半。

设：在三角形*HPE*、*EQF*、*FRG*、*GSH*的每一个上作与圆锥等高的棱锥，

因此：所作棱锥的每一个都大于包含它的相应的弓形上圆锥的一半，

所以：二等分得到的弧，用线段连接，在每个三角形上作与圆锥等高的棱锥。

如此作下去，就得到一些弓形圆锥的和小于立体*X*。[X. 1]

设：得到的是*HP*、*PE*、*EQ*、*QF*、*FR*、*RG*、*GS*、*SH*上的弓形圆锥，

因此：剩下的以多边形*HPEQFRGS*为底，并且和圆锥等高的棱锥大于立体*O*。

设：内接于圆*ABCD*的多边形*DTAUBVCW*与多边形*HPEQFRGS*相似且有相似位置，

在它上面作与圆锥*AL*等高的棱锥，

所以：*AC*上的正方形比*EG*上的正方形如同多边形*DTAUBVCW*比多边形*HPEQFRGS*，[XII. 1]

所以：*AC*上的正方形比*EG*上的正方形如同圆*ABCD*比圆*EFGH*，[XII. 2]

因此：圆*ABCD*比圆*EFGH*如同多边形*DTAUBVCW*比多边形*HPEQFRGS*。

因为：圆*ABCD*比圆*EFGH*如同圆锥*AL*比立体*O*，多边形*DTAUBVCW*比多边形*HPEQFRGS*如同以多边形*DTAUBVCW*为底且以*L*为顶点的棱

锥，比以多边形*HPEQFRGS*为底且以*N*为顶点的棱锥，[XII. 6]

因此：圆锥*AL*比立体*O*如同以多边形*DTAUBVCW*为底以*L*为顶点的棱锥，比以多边形*HPEQFRGS*为底以*N*为顶点的棱锥，[V. 11]

所以，由更比：圆锥*AL*比它内的棱锥如同立体*O*比圆锥*EN*内的棱锥。[V. 16]

因为：圆锥*AL*大于它的内接棱锥，

所以：立体*O*大于圆锥*EN*内的棱锥。

又因：它小于圆锥*EN*内的棱锥，

这是不符合实际的，

因此：圆锥*AL*比小于圆锥*EN*的任何立体都不同于圆*ABCD*比圆*EFGH*。

同理可证：圆锥*EN*比任何小于圆锥*AL*的立体都不同于圆*EFGH*比圆*ABCD*。

接下来可以证明：圆锥*AL*比大于圆锥*EN*的某一立体不同于圆*ABCD*比圆*EFGH*。

设：如果相等，符合这个比的是较大的立体*O*，

由反比：圆*CFGH*比圆*ABCD*如同立体*O*比圆锥*AL*。

又因：立体*O*比圆锥*AL*如同圆锥*EN*比某个小于圆锥*AL*的立体，

因此：圆*EFGH*比圆*ABCD*如同圆锥*EN*比小于圆锥*AL*的某个立体，

又已经证明：这是不符合实际的，

所以：圆锥*AL*比大于圆锥*EN*的某个立体不同于圆*ABCD*比圆*EFGH*。

已经证明：符合这个比而小于立体*EN*的立体是没有的，

因此：圆*ABCD*比圆*EFGH*如同圆锥*AL*比圆锥*EN*。

因为：圆柱三倍于圆锥，

所以：圆锥比圆锥等于圆柱比圆柱，[XII. 10]

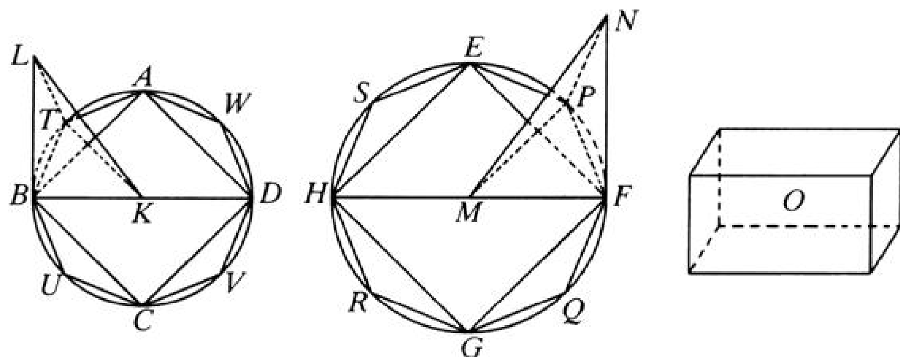
因此：圆*ABCD*比圆*EFGH*如同在它们上等高的圆柱的比。

证完。

命题12

…

相似圆锥或相似圆柱之比如同它们底的直径的三次比。



设：有相似圆锥和相似圆柱，

且圆*ABCD*、*EFGH*是它们的底，*BD*与*FH*是底的直径，并且*KL*、*MN*是圆锥及圆柱的轴。

那么可以说：以圆*ABCD*为底且以*L*为顶点的圆锥与以圆*EFGH*为底且以*N*为顶点的圆锥的比如同*BD*与*FH*的二次比。

设：圆锥*ABCDL*与圆锥*EFGHN*的比不同于*BD*与*FH*的三次比。

那么：圆锥*ABCDL*与某一小于或大于圆锥*EFGHN*的立体的比如同*BD*与*FH*的三次比。

设：它与较小的立体*O*有着三次比，

正方形*EFGH*内接于圆*EFGH*，[IV. 6]

所以：正方形*EFGH*大于圆*EFGH*的一半。

设：正方形*EFGH*上有一个和圆锥同顶点的棱锥，

因此：此棱锥大于圆锥的一半。

设：点*P*、*Q*、*R*、*S*二等分圆弧*EF*、*FG*、*GH*、*HE*，

连接*EP*、*PF*、*FQ*、*QG*、*GR*、*RH*、*HS*、*SE*，

因此：每个三角形*EPF*、*FQG*、*GRH*、*HSE*大于圆*EFGH*中包含它的弓形的一半。

设：在每个三角形*EPF*、*FQG*、*GRH*、*HSE*上作一个和圆锥同顶点的棱锥，

因此：这样的每个棱锥大于包含它们的弓形圆锥上锥体的一半，

那么：以二等分得到的圆弧作弦，在每个三角形上作与圆锥有相同顶点的棱锥，如此作下去可以得到，某些弓形圆锥的和小于圆锥*EFGHN*超过立体*O*的部分。[X. 1]

设：这样得到*EP*、*PF*、*FQ*、*QG*、*GR*、*RH*、*HS*、*SE*上的弓形圆锥，

所以：剩下的以多边形*EPFQGRHS*为底，以点*N*为顶点的棱锥大于立体*O*。

设：圆*ABCD*的内接多边形*ATBUCVDW*与多边形*EPFQGRHS*相似且有相似位置，

在多边形*ATBUCVDW*上作与圆锥同顶点的棱锥；

以多边形*ATBUCVDW*为底，以*L*为顶点；

由许多三角形围成一个棱锥，*LBT*为其三角形之一；

以多边形*EPFQGRHS*为底且以点*N*为顶点；

由许多三角形围成一个棱锥，*NFP*为其三角形之一，

接连*KT*、*MP*。

因为：圆锥*ABCDL*相似于圆锥*EFGHN*，

所以：*BD*比*FH*如同轴*KL*比轴*MN*。[XI. 定义24]

因为：*BD*比*FH*如同*BK*比*FM*，

所以：*BK*比*FM*如同*FL*比*MN*，

由更比：*BK*比*KL*如同*FM*比*MN*，[V. 16]

因此：夹等角的边成比例，也就是夹角*BKL*、*FMN*，

所以：三角形*BKL*与三角形*FMN*相似。[VI. 6]

因为：*BK*比*KT*如同*FM*比*MP*，

它们是夹等角的，也就是角*BKT*、*FMP*，

因为：无论角*BKT*在圆心*K*的四个直角占多少部分，

角*FMP*也在圆心*M*的四个直角占同样多部分，

又因：夹等角的边成比例，

所以：三角形*BKT*与三角形*FMP*相似。[VI. 6]

已经证明：*BK*比*KL*如同*FM*比*MN*，

因此：*BK*等于*KT*，且*FM*等于*PM*，

因此：*TK*比*KL*如同*PM*比*MN*。

因为：*TKL*、*PMN*是直角，

所以：夹等角的边成比例，也就是等角*TKL*、*PMN*，

因此：三角形*LKT*与三角形*NMP*相似。[VI. 6]

因为：三角形*LKB*与*NMF*相似，

*LB*比*BK*如同*NF*比*FM*，

且三角形*BKT*与*FMP*相似，

*KB*比*BT*如同*MF*比*FP*，

因此，由首末比：*LB*比*BT*如同*NF*比*FP*。[V. 22]

因为：三角形*LTK*与*NPM*相似，

*LT*比*TK*如同*NP*比*PM*，

因为：三角形*TKB*与*PMF*相似，

*KT*比*TB*如同*MP*比*PF*，

因此，由首末比：*LT*比*TB*如同*NP*比*PF*。[V. 22]

又因，已经证明：*TB*比*BL*如同*PF*比*FN*，

因此，由首末比：*TL*比*LB*如同*PN*比*NF*。[V. 22]

已经证明：*TB*比*BL*如同*PF*比*FN*，

由首末比：*TL*比*LB*如同*PN*比*NF*，[V. 22]

所以：在三角形*LTB*与*NPF*中它们的边成比例，

因此：三角形*LTB*与*NPF*是等角的，[VI. 5]

所以：它们也相似，[VI. 定义I]

因而：以三角形*BKT*为底且以点*L*为顶点的棱锥也相似于以三角形*FMP*为底且以点*N*为顶点的棱锥。

因为：围成它们的面数相等且各面相似，[XI. 定义9]

又因：两个以三角形为底的相似棱锥之比如同对应边的三次比，[XII. 8]

所以：棱锥*BKTL*比棱锥*FMPN*如同*BK*与*FM*的三次比。

同理：由*A*、*W*、*D*、*V*、*C*、*U*到*K*连线段，从*E*、*S*、*H*、*R*、*G*、*Q*到*M*连线段，在每个三角形上作与圆锥有相同顶点的棱锥。

可以证明：每对相似棱锥的比如同对应边*BK*与对应边*FM*的三次比，

也就是*BD*与*FH*的三次比，

前项之一比后项之一如同所有前项之和比所有后项之和，[V. 12]

因此：棱锥*BKTL*比棱锥*FMPN*如同以多边形*ATBUCVDW*为底且以点*L*为顶点的整体棱锥比以多边形*EPFQGRHS*为底且以点*N*为顶点的整体棱锥，

所以：得到以*ATBUCVDW*为底且以点*L*为顶点的棱锥比以多边形*EPFQGRHS*为底且以点*N*为顶点的棱锥如同*BD*与*FH*的三次比。

设：以圆*ABCD*为底以点*L*为顶点的圆锥比立体*O*如同*BD*与*FH*的三次比，

因此：以圆*ABCD*为底以点*L*为顶点的圆锥比立体*O*如同以多边形*ATBUCVDW*为底且以*L*为顶点的棱锥比以多边形*EPFQGRHS*为底且以点*N*为顶点的棱锥，

因此，由更比：以圆*ABCD*为底且以*L*为顶点的圆锥比包含在它内的以多边形*ATBUCVDW*为底且以*L*为顶点的棱锥如同立体*O*比以多边形*EPFQGRHS*为底且以*N*为顶点的棱锥。[V. 16]

因为：圆锥包含着棱锥，

所以：此处圆锥大于它内的棱锥，

因此：立体O大于以多边形$EPFQGRHS$为底且以N为顶点的棱锥。

但是它也小于它，

这是不符合实际的，

因此：以圆$ABCD$为底且以L为顶点的圆锥比任何小于以圆$EFGH$为底且以点N为顶点的圆锥的立体都不同于BD与FH的三次比。

同理可证：圆锥$EFGHN$与任何小于圆锥$ABCDL$的立体的比不同于FH与BD的三次比。

接下来可以证明：圆锥$ABCDL$比任何大于圆锥$EFGHN$的立体不同于BD与FH的三次比。

这是因为，如果可能，设：和一个较大的立体O有这样的比，

因此，由反比：立体O与圆锥$ABCDL$的比如同FH与BD的三次比。

因为：立体O比圆锥$ABCDL$如同圆锥$EFGHN$比某个小于圆锥$ABCDL$的立体，

所以：圆锥$EFGHN$与某一小于圆锥$ABCDL$的立体的比如同FH与BD的三次比，

已经证明：这是不符合实际的，

因此：圆锥$ABCDL$与任何大于圆锥$EFGHN$的立体的比不同于BD与FH的三次比。

又因，已经证明：与一个小于圆锥$EFGHN$的立体的比不同于这个比，

因此：圆锥$ABCD$与圆锥$EFGHN$的比如同BD与FH的三次比。

因为：圆锥比圆锥如同圆柱比圆柱，

且同底等高的圆柱是圆锥的三倍，[XII. 10]

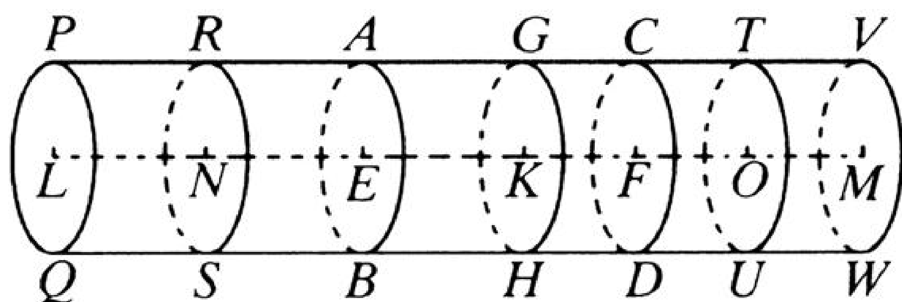
因此：圆柱与圆柱之比也如同*BD*与*FH*的三次比。

证完。

命题13

…

假如一个圆柱被平行于它的底面的平面所截，那么截得的圆柱比圆柱如同轴比轴。



设：圆柱*AD*被平行于底面*AB*、*CD*的平面*GH*所截，

平面*GH*交轴于*K*点。

那么可以说：圆柱*BG*比圆柱*GD*如同轴*EK*比轴*KF*。

设：向两方延长轴*EF*至*L*、*M*，

任取轴*EN*、*NL*等于轴*EK*，取*FO*、*OM*等于*FK*，

以*LM*为轴的圆柱*PW*其底为圆*PQ*、*VM*。

过点*N*、*O*作平行于*AB*、*CD*的平面且平行于圆柱*PW*的底，

以*N*、*O*为圆心而得出的圆为*RS*、*TU*。

因为：轴LN、NE、EK彼此相等，

所以：圆柱QR、RB、BG彼此之比如同它们的底之比。[XII. 11]

因为：它们的底是相等的，

所以：圆柱QR、RB、BG也彼此相等。

因为：轴LN、NE、EK彼此相等，

圆柱QR、RB、BG也彼此相等，

前者的个数等于后者的个数，

因此：轴KL是轴EK的无论多少倍数，圆柱QG也是圆柱GB的同样倍数。

同理：轴MK是轴KF的无论多少倍数，圆柱WG也是圆柱GD的同样倍数。

设：轴KL等于轴KM，

那么：圆柱QG等于圆柱GW。

设：轴KL大于轴KM，

那么：圆柱QG大于圆柱GW。

设：轴KL小于轴KM，

那么：圆柱QG小于圆柱GW，

所以：存在四个量，轴EK、KF和圆柱BG、GD。

已知：轴EK和圆柱BG的同倍量，也就是轴LK和圆柱QG。

取定轴KF和圆柱GD的同倍量，也就是轴KM及圆柱GW。

已经证明：假如轴KL大于轴KM，那么圆柱QG大于圆柱GW。

设：轴*KL*等于轴*KM*，

那么：圆柱*QG*等于圆柱*GW*。

设：轴*KL*小于*KM*，

那么：圆柱*QG*小于圆柱*GW*，

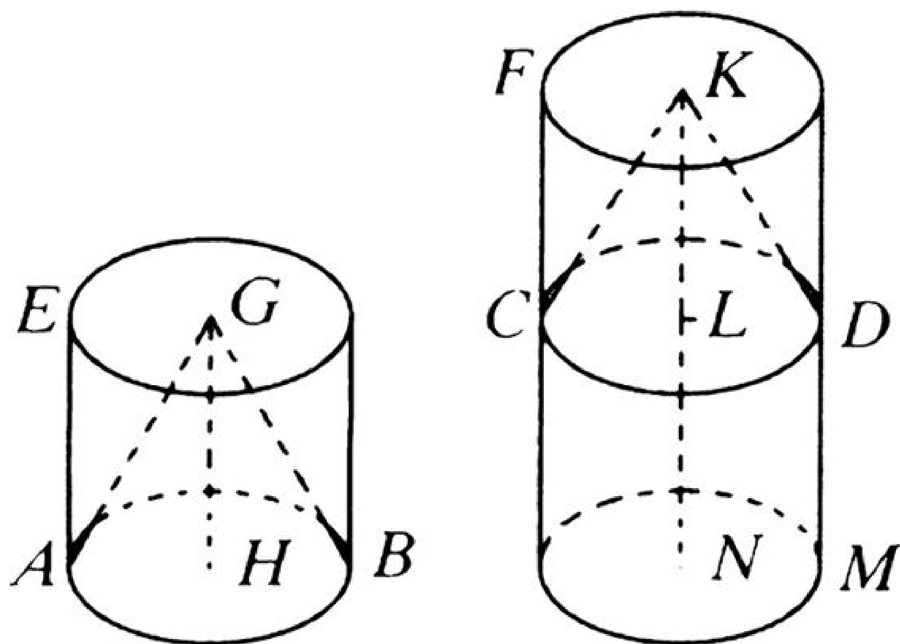
因此：轴*EK*比轴*KF*如同圆柱*BG*比圆柱*GD*。[V. 定义5]

证完。

命题14

…

有等底的圆锥或圆柱之比如同它们的高之比。



设：*EB*、*FD*是等底的两个圆柱，底为圆*AB*、*CD*。

那么可以说：圆柱*EB*比圆柱*FD*如同高*GH*比高*KL*。

设：延长轴KL到点N，使LN等于轴GH，而CM是以LN为轴的圆柱。

因为：圆柱EB、CM等高，

所以：它们的比等于它们的底之比。[XII. 11]

因为：它们的底彼此相等，

因此：圆柱EB与圆柱CM也相等。

因为：圆柱FM被平行于它的底面的平面CD所截，

因此：圆柱CM比圆柱FD如同轴LN比轴KL。[XII. 13]

因为：圆柱CM等于圆柱EB，轴LN等于轴GH，

所以：圆柱EB比圆柱FD如同轴GH比轴KL。

因为：圆柱EB比圆柱FD如同圆锥ABG比圆锥CDK，[XII. 10]

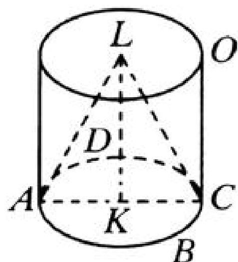
因此：轴GH比轴KL如同圆锥ABG比圆锥CDK，又如同圆柱EB比圆柱FD。

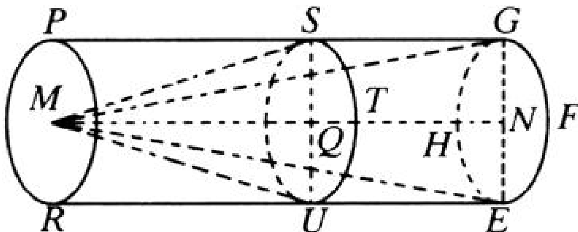
证完。

命题15

…

在相等的圆锥或圆柱中，它们底与高成互反比例；如果圆锥或圆柱的底与高成互反比例，那么二者相等。





设：有以圆$ABCD$、$EFGH$为底的两个相等的圆锥或圆柱，则AC、EG为底的直径。

KL、MN是轴，也是圆锥或圆柱的高，且已经作出圆柱AO、EP。

那么可以说：圆柱AO、EP的底与高成互反比例，

也就是底$ABCD$比底$EFGH$如同高MN比高KL。

因为：高LK要么等于高MN，要么不等于高MN，

先设：高LK等于高MN，

因为：圆柱AO等于圆柱EP，

并且圆锥或圆柱等高，它们的比如同它们底的比，[XII. 11]

因此：底$ABCD$等于底$EFGH$。

由互反比例：底$ABCD$比底$EFGH$如同高MN比高KL。

设：高LK不等于MN，而MN较大。

设：从高MN截取QN等于KL，过点Q作平面TUS截圆柱EP而平行于圆$EFGH$、RP所在的平面，圆柱ES以圆$EFGH$为底，NQ为高。

因为：圆柱AO等于圆柱EP，

因此：圆柱AO比圆柱ES如同圆柱EP比圆柱ES。[V. 7]

因为：圆柱AO、ES是等高的，

所以：圆柱AO比圆柱ES如同底$ABCD$比底$EFGH$。[XII. 11]

因为：圆柱EP比圆柱ES如同高MN比高QN，

并且圆柱E被一个平面所截而此平面又平行于相对二底面，[XII. 13]

因此：底$ABCD$比底$EFGH$如同高MN比高QN。[V. 11]

因为：高QN等于高KL，

所以：底$ABCD$比底$EFGH$如同高MN比高KL，

因此：在圆柱AO、EP中，底与高成互反比例。

接下来，设：在圆柱AO、EP中，底与高互成反比例，

也就是底$ABCD$比底$EFGH$如同高MN比高KL，

那么可以说：圆柱AO等于圆柱EP。

作同一图。

因为：底$ABCD$比底$EFGH$如同高MN比高KL，

因此：高KL等于高QN，

那么：底$ABCD$比底$EFGH$如同高MN比高QN。

因为：底$ABCD$与底$EFGH$同高，

所以：底$ABCD$比底$EFGH$如同圆柱AO比圆柱ES。[XII. 11]

因为：高MN比QN如同圆柱EP比圆柱ES，[XII. 13]

因此：圆柱AO比圆柱ES如同圆柱EP比圆柱ES。[V. 11]

因为：圆柱AO等于圆柱EP，[V. 9]

所以：对圆锥来说也同样是正确的。

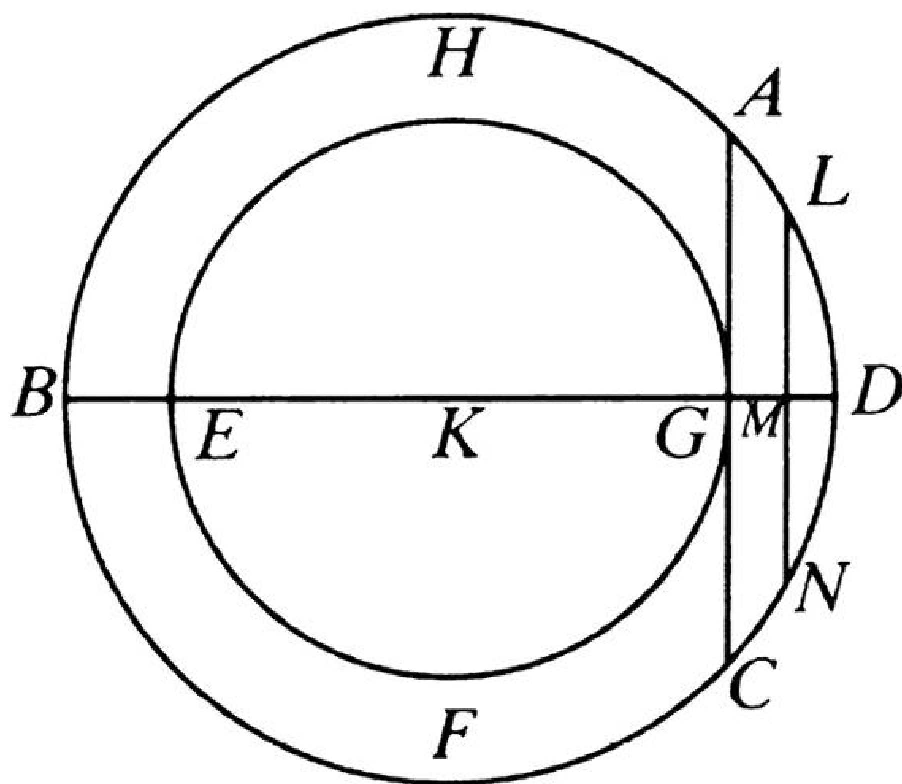
证完。

命题16

…

已知两个同心圆，求作内接于大圆的偶数条边的等边多边形，使它与小

圆不相切。



设：有同心于*K*的两个给定圆*ABCD*、*EFGH*。

要求：作内接于大圆*ABCD*的偶数条边的等边多边形，它与小圆*EFGH*不相切。

设：经过圆心*K*作直径*BKD*，从点*G*作*GA*与直径*BD*成直角，并且延长至点*C*。

所以：*AC*切圆*EFGH*。[III. 16，推论]

设：平分弧*BAD*，将所分的一半再平分，如此下去得到一条比*AD*小的弧*LD*。[X. 1]

从*L*作*LM*垂直于*BD*并且延长至*N*，

连接*LD*、*DN*，

所以：LD等于DN。[III. 3，I. 4]

因为：LN平行于AC，并且AC切于圆$EFGH$，

因此：LN与圆$EFGH$不相切，

因此：LD、DN更与圆$EFGH$不相切。

设：在圆$ABCD$内连续作等于LD的弦，

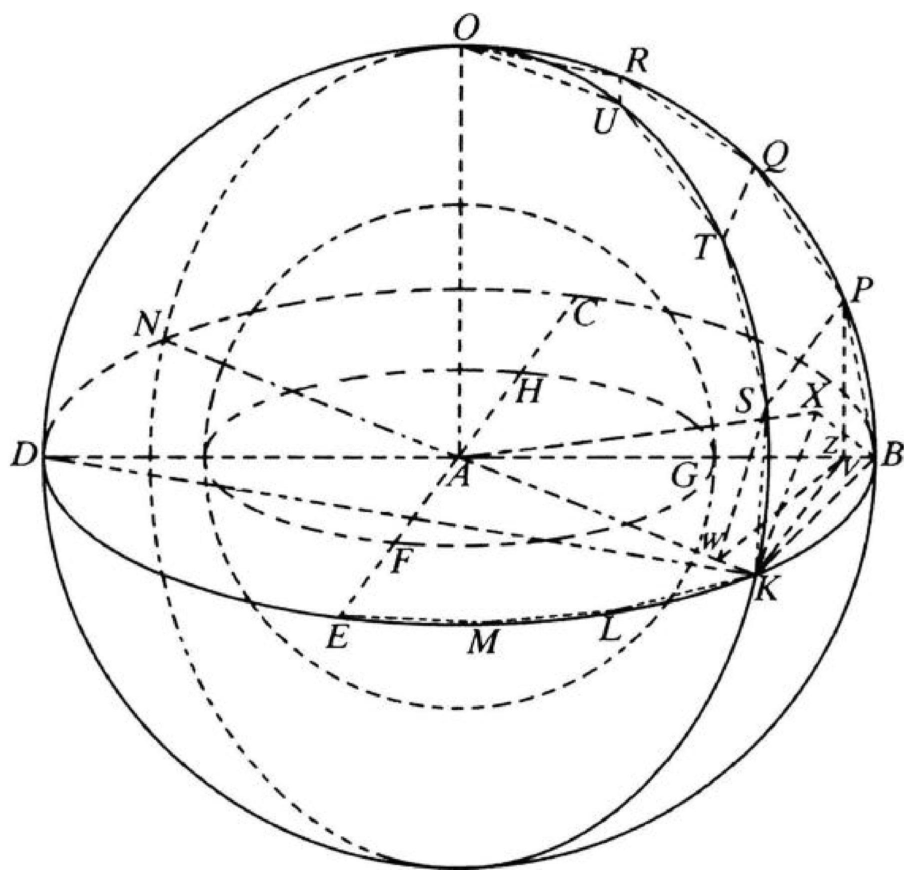
那么：将得到内接于$ABCD$的偶数边的等边多边形，它与小圆$EFGH$不相切。

作完。

命题17

…

已知两个同心球，在大球内作内接多面体，使它与小球面不相切。



设：有同心于点A的两球，

要求：在大球内作内接多面体，使它与小球面不相切，

而球被过球心的任一平面所截，截迹为一个圆，

因为：球是半圆绕直径旋转而成的，[XI. 定义14]

所以：在任何位置我们都可得到半圆，由此经过半圆的平面在球面上截出一个圆。

因为：球的直径，也是半圆和这个圆的直径，它大于所有经过圆内或者球内的线段，

所以：这个圆是最大的，

设：$BCDE$是大球内的一个圆，并且FGH是小球内的一个圆。

设：在它们中有成直角的两条直径*BD*、*CE*。

那么：给定的圆*BCDE*、*FGH*是同心圆。在大圆*BCDE*中有一个内接偶数条边的等边多边形，它和小圆*EGH*不相切。

设：*BK*、*KL*、*LM*、*ME*是象限*BE*内的边，

连接*KA*延长至*N*。

从点*A*作直线*AO*与圆*BCDE*所在的平面成直角，交球面于点*O*。

过*AO*与直径*BD*、*KN*作平面，它们和球面截出最大圆。这是符合实际的。

设：已经作出它们，并且*BOD*、*KON*是*BD*、*KN*上的半圆。

因为：*OA*和圆*BCDE*所在的平面成直角，

因此：经过*OA*的平面都和圆*BCDE*所在的平面成直角，[XI. 18]

所以：半圆*BOD*、*KON*也和圆*BCDE*所在的平面成直角。

因为：它们在相等的直径*BD*、*KN*上，

所以：半圆*BED*、*BOD*、*KON*是相等的，

因此：象限*BE*、*BO*、*KO*也彼此相等，

那么：在象限*BO*、*KO*上有多少条弦等于弦*BK*、*KL*、*LM*、*ME*，就在象限*BE*上有多边形的多少条边。

设：它们是内接的，为*BP*、*PQ*、*QR*、*RO*以及*KS*、*ST*、*TU*、*UO*。

连接*SP*、*TQ*、*UR*，

由*P*、*S*作圆*BCDE*所在的平面的垂线，[XI. 11]

它们交平面的公共交线*BD*、*KN*上。

因为：*BOD*、*KON*所在的平面与圆*BCDE*所在的平面成直角，[参见

XI. 定义4]

设：它们是PV、SW，连接WV，

因为：在相等的半圆BOD、KON内已经截出了相等的弦BP、KS，已经作出垂线PV、SW，

因此：PV等于SW，而BV等于KW。[III. 27，I. 26]

因为：整体BA等于整体KA，

因此：余下的VA等于余下的WA，

因此：BV比VA如同KW比WA，

所以：WV平行于KB。[VI. 2]

因为：线段PV、SW每条都与圆$BCDE$所在平面成直角，

因此：PV和SW平行。[XI. 6]

又因，已经证明：WV与SP也是相等的。

因此：WV、SP既相等又平行。[I. 33]

因为：WV平行于SP，

且WV平行于KB，

因此：SP也平行于KB。[XI. 9]

接下来，连接BP、KS的端点，

那么：四边形$KBPS$在同一平面上，

因为：假如两条直线是平行的，在它们每一条上任意取点，连接这些点的线与该二平行线在同一平面上，[XI. 7]

同理：四边形$SPQT$、$TQRU$的每一个都在同一平面上，

因为：三角形*URO*也在同一平面上，[XI. 2]

设：由点*P*、*S*、*Q*、*T*、*R*、*U*到*A*连接直线，作出在弧*BO*、*KO*之间的一个多面体，包含了四边形*KBPS*、*SPQT*、*TQRU*以及三角形*URO*为底且以*A*为顶点的棱锥，

设：在边*KL*、*LM*、*ME*的每一个上像在*BK*上一样给出同样的作图，

更进一步在其余三个象限内也给出同样的作图，

因此：得到一个由棱锥构成的内接于球的多面体，是由前述的四边形和三角形*URO*以及它们对应的其他一些四边形和三角形为底且以*A*为顶点的棱锥构成，

那么可以说：前面所说的多面体不切于由圆*FGH*生成的球面。

设：*AX*是由点*A*所作的四边形*KBPS*所在平面的垂线，与平面交于点*X*，[XI. 11]

连接*XK*、*XK*，

那么：*AX*与四边形*KBPS*所在平面成直角，

由此：它也和四边形所在平面上所有和它相交的直线成直角，[XI. 定义3]

因此：*AX*和直线*BX*、*XK*的每一条成直角。

因为：*AB*等于*AK*、*AB*上的正方形等于*AK*上的正方形，

并且：*AX*、*XB*上的正方形的和等于*AB*上的正方形，这是因为X处的是直角，[I. 47]

所以：*AX*、*XK*上的正方形的和等于*AK*上的正方形，

因此：*AX*、*XB*上的正方形的和等于*AX*、*XK*上的正方形的和。

设：从它们中各减去*AX*上的正方形，

那么：余下的*BX*上的正方形等于余下的*XK*上的正方形，

因此：*BX*等于*XK*。

同理可证：X到*P*、*S*连接的线段等于线段*BX*、*XK*的每一个，

所以：以X为圆心，并以*XB*或*XK*为距离的圆通过*P*、*S*，且*KBPS*是圆内接四边形。

因为：*KB*大于*WV*，且*WV*等于*SP*，

因此：*KB*大于*SP*。

因为：*KB*等于线段*KS*及*BP*的每一个，

因此：线段*KS*、*BP*的每一个大于*SP*，

因为：*KBPS*是圆内的四边形，并且*KB*、*BP*、*KS*相等，又*PS*小于它们，*BX*是圆的半径，

所以：*KB*上的正方形大于*BX*上的正方形的二倍。

设：从*K*作*KZ*垂直于*B*V，

那么：*BD*小于*DZ*的二倍。

因为：*BD*比*DZ*如同矩形*DB*、*BZ*比矩形*DZ*、*ZB*，

设：在*BZ*上作一个正方形，把*ZD*上的平行四边形画出来，

那么：矩形*DB*、*BZ*小于矩形*DZ*、*ZB*的二倍。

设：连接*KD*，矩形*DB*、*BZ*等于*BK*上的正方形，矩形*DZ*、*ZB*等于*KZ*上的正方形，[III. 31，VI. 8，推论]

所以：*KB*上的正方形小于*KZ*上的正方形的二倍。

因为：*KB*上的正方形大于*BX*上的正方形的二倍，

因此：*KZ*上的正方形大于*BX*上的正方形。

因为：BA等于KA，而BA上的正方形等于AK上的正方形，

因为：BX、XA上的正方形的和等于BA上的正方形，并且KZ、ZA上的正方形的和等于KA上的正方形，[I. 47]

所以：BX、XA上的正方形的和等于KZ、ZA上的正方形的和，并且其中KZ上的正方形大于BX上的正方形，

因此：余下的ZA上的正方形小于XA上的正方形，

因此：AX大于AZ，

所以：AX更大于AG。

因为：AX是多面体一个底上的垂线，AG在小球的球面上，从而多面体与小球的球面不相切，

所以：对已知二同心球作了一个多面体，内接于大球面而不与小球的球面相切。

作完。

推论　假如另外一个球的内接多面体相似于球$BCDE$的内接多面体。那么，球$BCDE$的内接多面体比另一球的内接多面体如同球$BCDE$的直径与另一球的直径的三次比。

因为：这两个立体按顺序可分成同样个数的相似的棱锥，

又因：相似棱锥之比如同对应边的三次比，[XII. 8，推论]

因此：以四边形$KBPS$为底且以A为顶点的棱锥与另一球内按顺序相似的棱锥之比如同对应边与对应边的三次比。也就是，以A为心的球的半径与另一球的半径的三次比。

同理：在以A为心的球中的每个棱锥比另一球中按顺序相似的棱锥如同AB与另一球的半径的三次比。

因为：前项之一比后项之一等于所有前项之和比所有后项之和，[V.

因此：在以A为心的球内的整体多面体比另一球内的整体多面体如同AB与另一球半径的三次比，

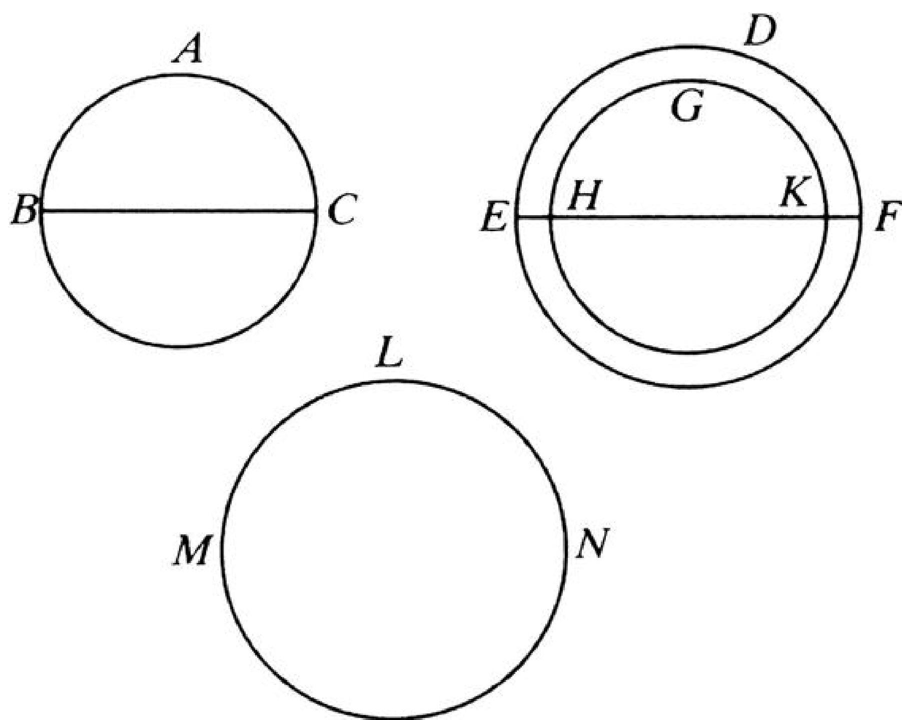
也就是直径BD与另一球直径的三次比。

证完。

命题18

…

球与球的比如同它们直径的三次比。



设：所论的两球为ABC、DEF，且BC、EF为它们的直径。

那么可以说：球ABC比球DEF如同BC比EF的三次比。

设：球*ABC*比球*DEF*不同于*BC*与*EF*的三次比，那么球*ABC*比某一个小于或大于球*DEF*的球如同*BC*与*EF*的三次比。

设：等于此比的是一个小球*GHK*，球*DEF*与球*GHK*同心，

在大球*DEF*内有一个内接多面体，它与小球*GHK*不相切，[XII. 17]

在球*ABC*内有一个内接多面体相似于球*DEF*内的内接多面体，

因此：*ABC*中多面体比*DEF*中的多面体如同*BC*与*EF*的三次比。[XII. 17，推论]

因为：球*ABC*比球*GHK*也如同*BC*与*EF*的三次比，

所以：球*ABC*比球*GHK*如同在球*ABC*中的多面体比球*DEF*中的多面体，

由更比：球*ABC*比它中的多面体如同球*GHK*比球*DEF*中的多面体。[V. 16]

因为：球*ABC*大于它中的多面体，

因此：球*GHK*大于球*DEF*中的多面体。

因为：它被*DEF*中的多面体包含着，

所以：它小于球*DEF*中的多面体，

所以：球*ABC*与一个小于球*DEF*的球之比不同于直径*BC*与直径*EF*的三次比。

同理可证：球*DEF*与一个小于球*ABC*的球之比也不同于*EF*与*BC*的三次比。

接下来可以证明：*ABC*与一个大于球*DEF*的球之比不同于*BC*与*EF*的三次比。

设：如果相同，能有这个比的一个大球为*LMN*，

由反比：球*LMN*与球*ABC*之比如同直径*EF*与*BC*的三次比。

因为：*LMN*大于*DEF*，

所以：球*LMN*比球*ABC*如同球*DEF*比某一个小于球*ABC*的球，

前面已证明过，[XII. 2，引理]

因此：球*DEF*也与一个小于球*ABC*的球之比如同*EF*与*BC*的三次比。

已经证明：这是不符合实际的，

所以：球*ABC*与一个大于球*DEF*的球之比不同于*BC*与*EF*的三次比。

已经证明：球*ABC*与小于球*DEF*的球之比也不同于*BC*与*EF*的三次比，

因此：球*ABC*比球*DEF*如同*BC*与*EF*的三次比。

证完。

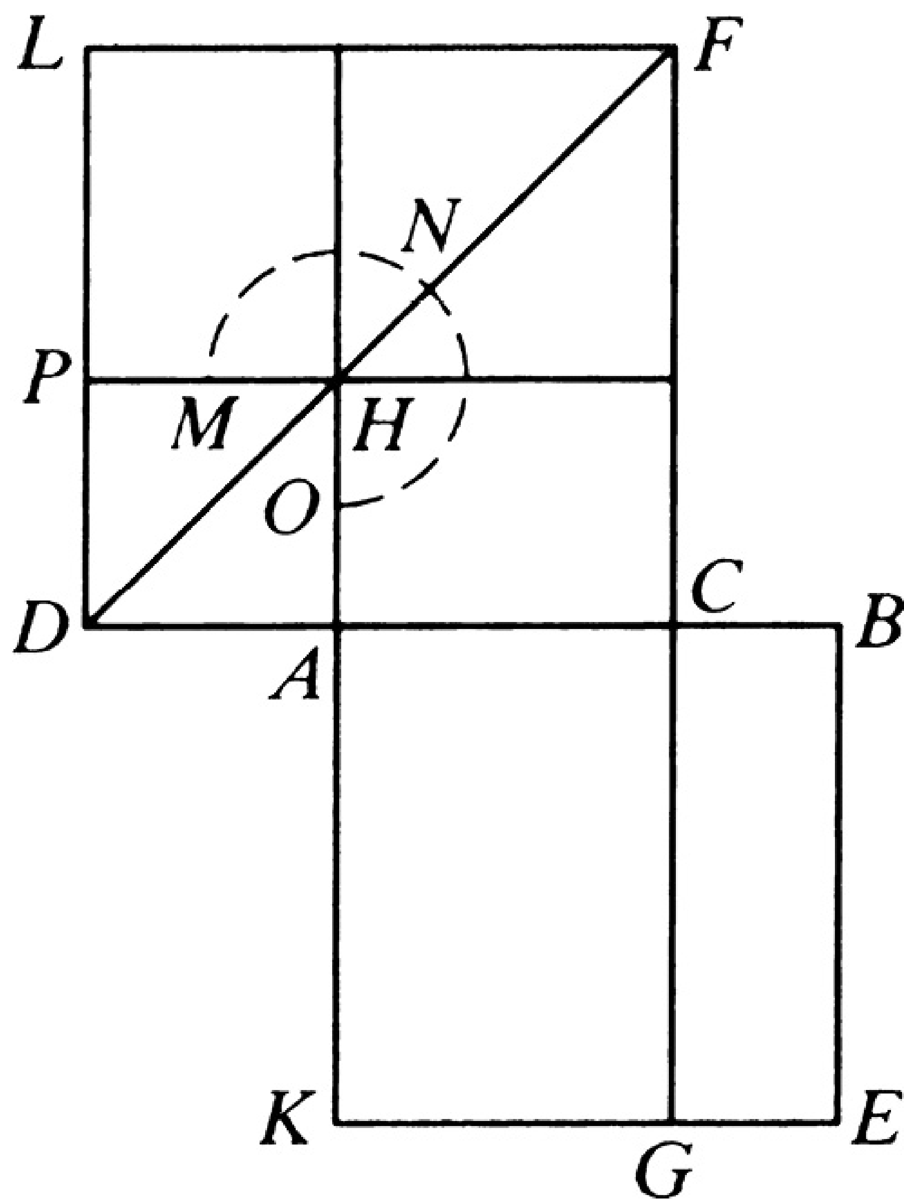
卷XIII

命题

命题1

…

假如把一线段分为中外比，那么大线段与原线段一半的和上的正方形等于原线段一半上的正方形的五倍。



设：线段AB被点C分为中外比，并且AB是较大线段。延长CA到D，使AD等于AB的一半。

那么可以说：CD上的正方形是AD上的正方形的五倍。

设：在AB、DC上作正方形AE、DF，

在DF上的图形已经作成，并且FC经过点G。

因为：点C分AB为中外比，

所以：矩形AB、BC等于AC上的正方形。[VI. 定义3，VI. 17]

因为：CE是矩形AB、BC，并且FH是AC上的正方形，

因此：CE等于FH。

因为：BA是AD的二倍，

并且BA等于KA，而AD等于AH，

因此：KA也是AH的二倍。

因为：KA比AH如同CK比CH，[VI. 1]

所以：CK是CH的二倍。

因为：LH、HC的和也是CH的二倍，

因此：KC等于LH、HC的和。

又因，已经证明：CE等于HF，

因此：整体正方形AE等于拐尺形MNO。

因为：BA是AD的二倍，

BA上的正方形是AD上的正方形的四倍，

也就是AE是DH的四倍，

并且AE等于拐尺形MNO，

所以：拐尺形MNO等于AP的四倍，

因此：整体DF等于AP的五倍。

因为：DF是DC上的正方形，AP是DA上的正方形，

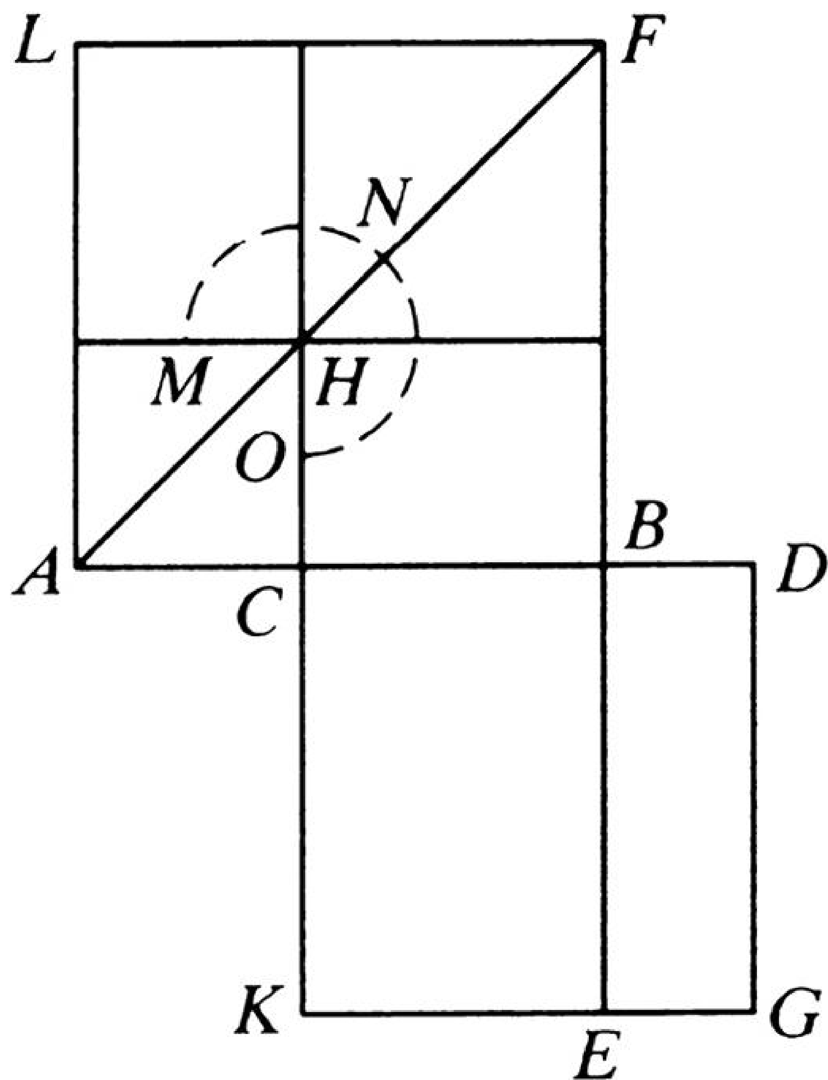
因此：CD上的正方形是DA上的正方形的五倍。

证完。

命题2

…

假如一线段上的正方形是它的部分线段上的正方形的五倍，那么，当这部分线段的二倍被分为中外比时，它较长线段是原来线段的所余部分。



设：线段AB上的正方形是它的部分线段AC上的正方形的五倍，CD是AC的二倍。

那么可以说：CD被分为中外比时，大线段是CB。

设：AF、CG分别是AB、CD上的正方形，

而在AF中的图形已经作出，画出BE。

因为：BA上的正方形是AC上的正方形的五倍，AF是AH的五倍，

因此：拐尺形MNO是AH的四倍。

因为：DC是CA的二倍，

所以：DC上的正方形是CA上的正方形的四倍，也就是CG是AH的四倍。

因为：已经证明了拐尺形MNO是AH的四倍，

因此：拐尺形MNO等于CG。

因为：DC是CA的二倍，且DC等于CK，而AC等于CH，

因此：KB也是BH的二倍。[VI. 1]

因为：LH、HB的和也是HB的二倍，

所以：KB等于LH、HB的和，

又因，已经证明：整体拐尺形MNO等于整体CG，

因此：余量HF等于BG，

因为：BG是矩形CD、DB，

并且CD等于DG，并且HF是CB上的正方形，

因此：矩形CD、DB等于CB上的正方形，

所以：DC比CB如同CB比BD。

因为：DC大于CB，

因此：CB大于BD，

所以：当线段CD被分为中外比时，CB是较大的部分。

证完。

引理

…

在如上命题中，证明AC的二倍大于BC。

倘若不是这样，但如果可能，设：BC是CA的二倍，

因此：BC上的正方形是CA上的正方形的四倍，

所以：BC、CA上的正方形的和是CA上的正方形的五倍。

又因，根据假设：BA上的正方形也是CA上的正方形的五倍，

因此：BA上的正方形等于BC、CA上的正方形的和，

这是不符合实际的，[II. 4]

因此：CB不等于AC的二倍。

同理可证：线段CA的二倍不小于CB，

这是不符合实际的，

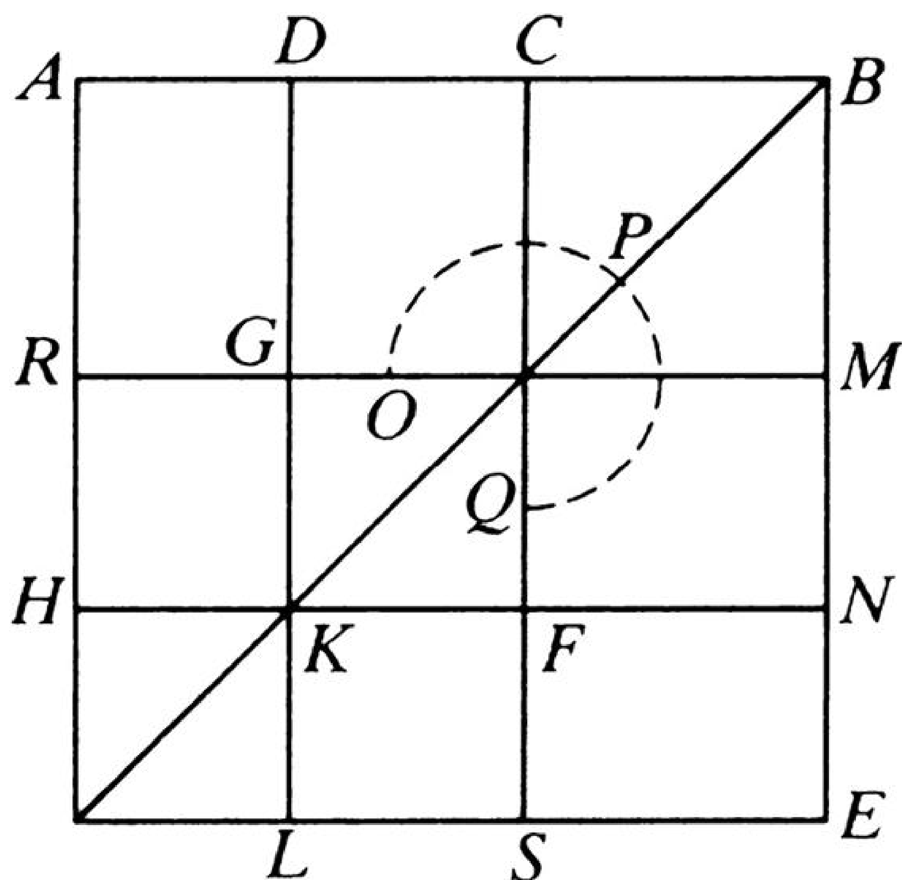
所以：AC的二倍大于CB。

证完。

命题3

…

假如将一线段分成中外比，那么小线段与大线段一半的和上的正方形是大线段一半上的正方形的五倍。



设：点C分一线段AB成中外比，其中AC是较大的一段，而D平分AC。

那么可以说：BD上的正方形是DC上的正方形的五倍。

设：正方形AE是作在AB上的，并已经作出此图形。

因为：AC是DC的二倍，

因此：AC上的正方形是DC上的正方形的四倍，

也就是RS是FG的四倍。

因为：矩形AB、BC等于AC上的正方形，并且CE是矩形AB、BC，

因此：CE等于RS。

因为：RS是FG的四倍，

因此：CE也是FG的四倍。

因为：AD等于DC，且HK等于KF，

所以：正方形GF等于正方形HL，

因此：GK等于KL，也就是MN等于NE，

所以：MF等于FE。

因为：MF等于CG，

所以：CG等于FE。

设：将CN加在以上两边，

因此：拐尺形OPQ等于CE。

又因，已经证明：CE是GF的四倍，

所以：拐尺形OPQ也是正方形FG的四倍，

因此：拐尺形OPQ与正方形FG的和是FG的五倍。

因为：拐尺形OPQ与正方形FG的和是正方形DN，

并且DN是DB上的正方形，GF是DC上的正方形，

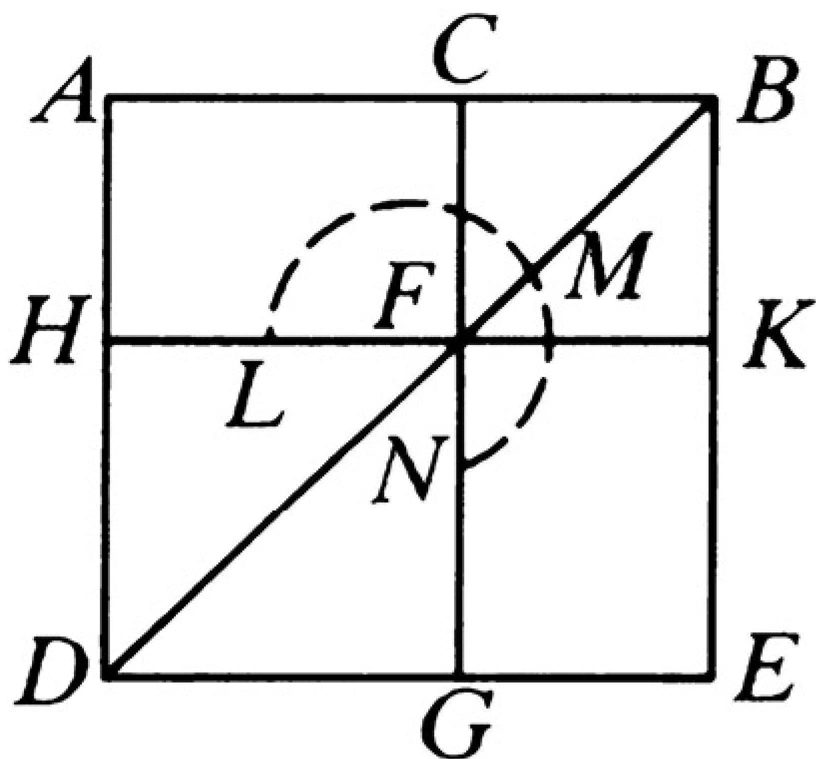
因此：DB上的正方形是DC上的正方形的五倍。

证完。

命题4

…

假如一条线段被分为中外比，那么整体线段上的正方形与小线段上的正方形的和是大线段上的正方形的三倍。



设：点*C*将线段*AB*分为中外比，其中*AC*是大线段，

那么可以说：*AB*、*BC*上的正方形的和是*CA*上的正方形的三倍。

设：*AB*上的正方形是*ADEB*，并且图形已作成。

因为：*AB*被*C*分成中外比，并且*AC*是大线段，

因此：*AB*、*BC*等于*AC*上的正方形。[VI. 定义3，VI. 17]

因为：*AK*是矩形*AB*、*BC*，并且*HG*是*AC*上的正方形，

因此：AK等于HG。

因为：AF等于FE，

将CK加在以上两边，

那么：整体AK等于整体CE，

所以：AK、CE的和是AK的二倍。

又因：AK、CE的和是拐尺形LMN与正方形CK的和，

因此：拐尺形LMN与正方形CK的和是AK的二倍。

又因，已经证明：AK等于HG，

所以：拐尺形LMN与正方形CK、HG的和是正方形HG的三倍。

因为：拐尺形LMN与正方形CK、HG的和是整体正方形AE与CK的和，

也就是AB、BC上的正方形的和，并且HG是AC上的正方形，

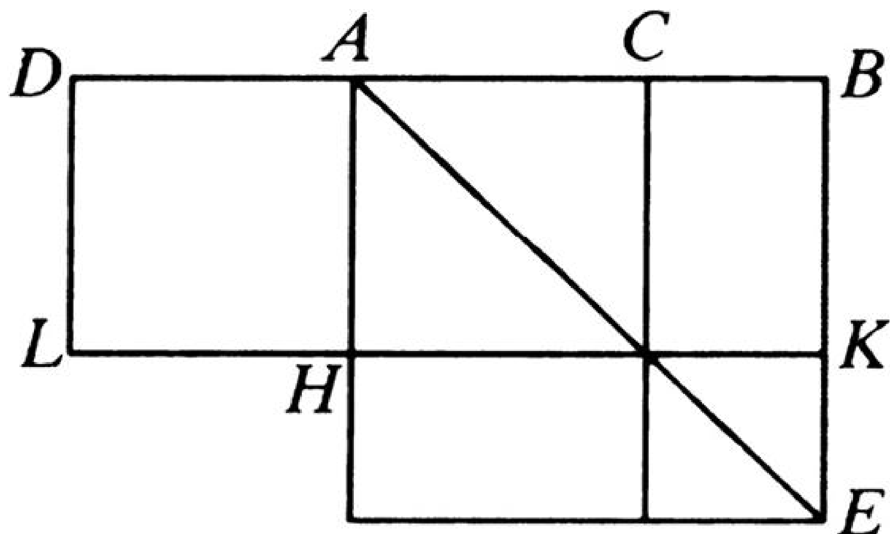
因此：AB、BC上的正方形的和是AC上正方形的三倍。

证完。

命题5

…

假如一线段被分为中外比，并且在此线段上加一条等于大线段的线段，那么整体线段被分为中外比，并且原线段是较大的线段。



设：线段*AB*被*C*分为中外比，并且*AC*是大的线段，且*AD*等于*AC*。

那么可以说：*DB*被*A*分为中外比，原线段*AB*是较大的线段。

设：作在*AB*上的正方形是*AE*，且此图已经作成。

因为：*AB*被*C*分为中外比，

因此：矩形*AB*、*BC*等于*AC*上的正方形。[VI. 定义3，VI. 17]

因为：*CE*是矩形*AB*、*BC*，并且*CH*是*AC*上的正方形，

所以：*CE*等于*HC*。

因为：*HE*等于*CE*，并且*DH*等于*HC*，

因此：*DH*等于*HE*，

因此：整体*DK*等于整体*AE*。

又因：*AD*等于*DL*，并且*AE*是*AB*上的正方形，

所以：*DK*是矩形*BD*、*DA*，

因此：矩形*BD*、*DA*等于*AB*上的正方形，

因此：*DB*比*BA*如同*BA*比*AD*。[VI. 17]

因为：*DB*大于*BA*，

所以：*BA*大于*AD*，[V. 14]

因此：*DB*被点*A*分成中外比，并且*AB*是较大线段。

证完。

命题6

…

假如一条有理线段被分成中外比，那么两部分线段的每一条线段是被称作余线的无理线段。



设：*C*把有理线段*AB*分成中外比，其中*AC*是较大的一段，

那么可以说：线段*AC*、*CB*是被称为余线的无理线段。

设：延长*BA*，使*AD*等于*BA*的一半。

因为：线段*AB*被分为中外比，把*AB*的一半*AD*加到大线段*AC*上，

因此：*CD*上的正方形是*DA*上的正方形的五倍。[XIII. 1]

因此：*CD*上的正方形与*DA*上的正方形之比是一个数与另一个数的比，

所以：*CD*上的正方形与*DA*上的正方形是可公度的。[X. 6]

又因：*DA*上的正方形是有理的，

并且：*DA*是有理的，*AB*的一半是有理的，

因此：CD上的正方形也是有理的，[X. 定义4]

所以：CD也是有理的。

因为：CD上的正方形比DA上的正方形不同于一个平方数与另一个平方数之比，

所以：CD与DA是长度不可公度的，[X. 9]

因此：CD、DA是仅正方可公度的有理线段，

因此：AC是一条余线。[X. 73]

因为：AB被分为中外比，并且AC是大线段，

所以：矩形AB、BC等于AC上的正方形，[VI. 定义3，VI. 17]

因此：余线AC上的正方形，倘若贴合在有理线段AB上，会产生BC为宽。

设：在有理线段上作一个矩形等于一条余线上的正方形，它的另一边是第一余线，[X. 97]

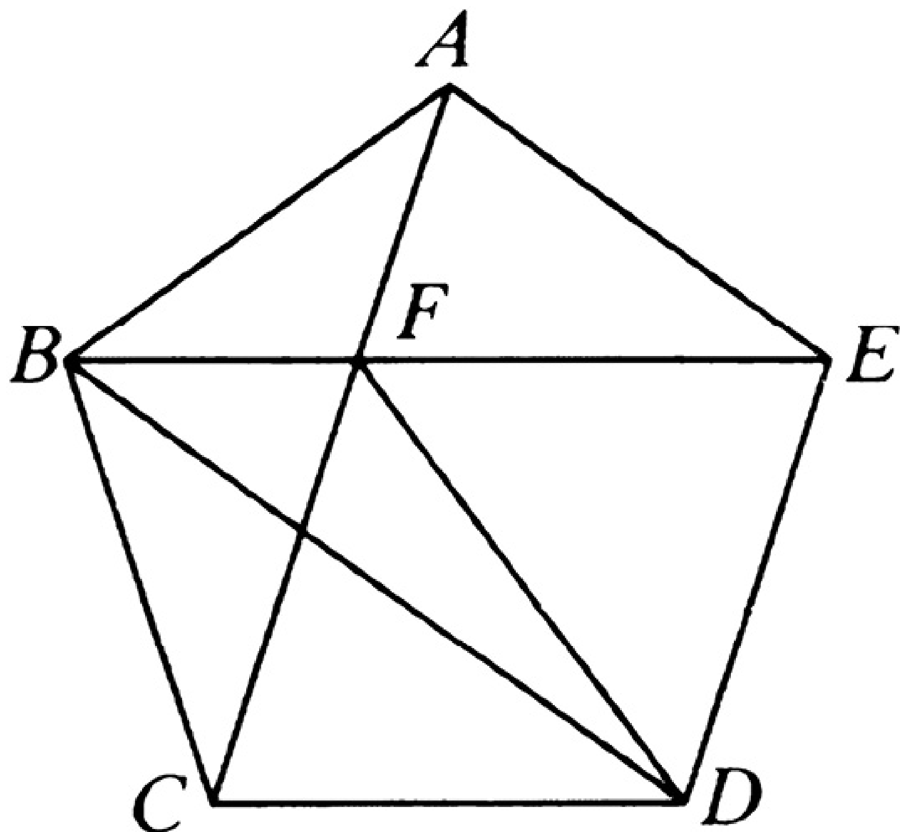
所以：CB是第一余线，并且已经证明CA也是一条余线。

证完。

命题7

…

假如一个等边五边形有三个相邻或不相邻的角相等，那么它是等角五边形。



设：在等边五边形*ABCDE*中有相邻的三个角*A*、*B*、*C*彼此相等。

那么可以说：五边形*ABCDE*是等角的，

连接*AC*、*BE*、*FD*。

因为：两边*CB*、*BA*分别等于两边*AB*、*AE*，

并且角*CBA*等于角*BAE*，

因此：底*AC*等于底*BE*，三角形*ABC*全等于三角形*ABE*，并且其余的角等于其余的角，它们都对着等边的角，[I. 4]

也就是，角*BCA*等于角*BEA*，角*ABE*等于角*CAB*，

因此：边*AF*等于边*BF*。

又因，已经证明：整体*AC*等于整体*BE*，

所以：其余的*FC*等于其余的*FE*。

因为：*CD*等于*DE*，

因此：两边*FC*、*CD*等于两边*FE*、*ED*，并且底*FD*是公共的，

因此：角*FCD*等于角*FED*。[I. 8]

又因，已经证明：角*BCA*等于角*AEB*，

因此：整体角*BCD*等于整体角*AED*。

根据假设：角*BCD*等于在*A*、*B*处的角，

因此：角*AED*等于在*A*、*B*处的角。

同理可证：角*CDE*等于在*A*、*B*、*C*处的角，

因此：五边形*ABCDE*是等角的。

又设：已知等角不是相邻的，也就是在*A*、*C*、*D*处的角是等角，

那么可以说：在这种情况下五边形*ABCDE*也是等角的。

连接*BD*。

因为：两边*BA*、*AE*等于两边*BC*、*CD*，它们夹着等角，

因此：底*BE*等于底*BD*，三角形*ABE*全等于三角形*BCD*，并且其余的角等于其余的角，

也就是等边所对的角，[I. 4]

因此：角*AEB*等于角*CDB*。

因为：角*BED*等于角*BDE*，

并且边*BE*等于边*BD*。[I. 5]

因此：整体角*AED*等于整体角*CDE*。

根据假设：角CDE等于在A、C处的角，

因此：角AED等于在A、C处的角。

同理：角ABC等于在A、C、D处的角，

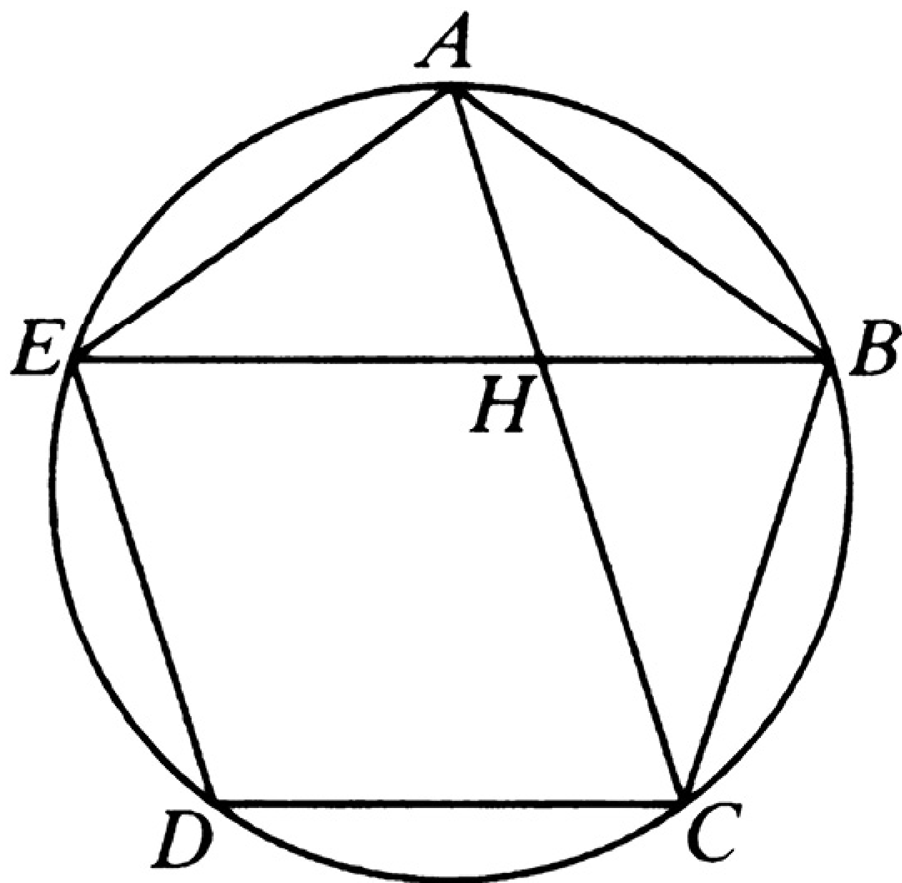
因此：五边形$ABCDE$是等角的。

证完。

命题8

…

假如在一个等边且等角的五边形中，用线段顺次连接相对两角，那么连线交成中外比，并且大线段等于五边形的边。



设：在等边且等角的五边形*ABCDE*中，在*A*、*B*处的角按顺序作对角线*AC*、*BE*交于点*H*。

那么可以说：两线段的每一条都被点*H*分为中外比，并且每条的大线段等于五边形的边。

设：圆*ABCDE*外接于五边形*ABCDE*。[IV. 14]

因为：两线段*EA*、*AB*等于两线段*AB*、*BC*，它们所夹的角相等，

因此：底*BE*等于底*AC*，

所以：三角形*ABE*全等于三角形*ABC*，其余的角也分别等于其余的角，也就是等边所对的角，[I. 4]

所以：角*BAC*等于角*ABE*，角*AHE*是角*BAH*的二倍。[I. 32]

因为：弧*EDC*是弧*CB*的二倍，

因此：角*EAC*是角*BAC*的二倍，[III. 28，VI. 33]

所以：角*HAE*等于角*AHE*，

因此：线段*HE*等于*EA*，也就是*AB*。[I. 6]

因为：线段*BA*等于*AE*，角*ABE*等于角*AEB*，[I. 5]

又因，已经证明：角*ABE*等于角*BAH*，

因此：角*BEA*等于角*BAH*。

因为：角*ABE*是三角形*ABE*与三角形*ABH*的公共角，

因此：其余的角*BAE*等于其余的角*AHB*，[I. 32]

因此：三角形*ABE*与三角形*ABH*是等角的，

所以，有比例：*EB*比*BA*如同*AB*比*BH*。[VI. 4]

又因：*BA*等于*EH*，

因此：*BE*比*EH*如同*EH*比*HB*。

因为：*BE*大于*EH*，

因此：*EH*大于*HB*，[V. 14]

所以：*BE*被*H*分为中外比，其大线段*HE*等于五边形的边。

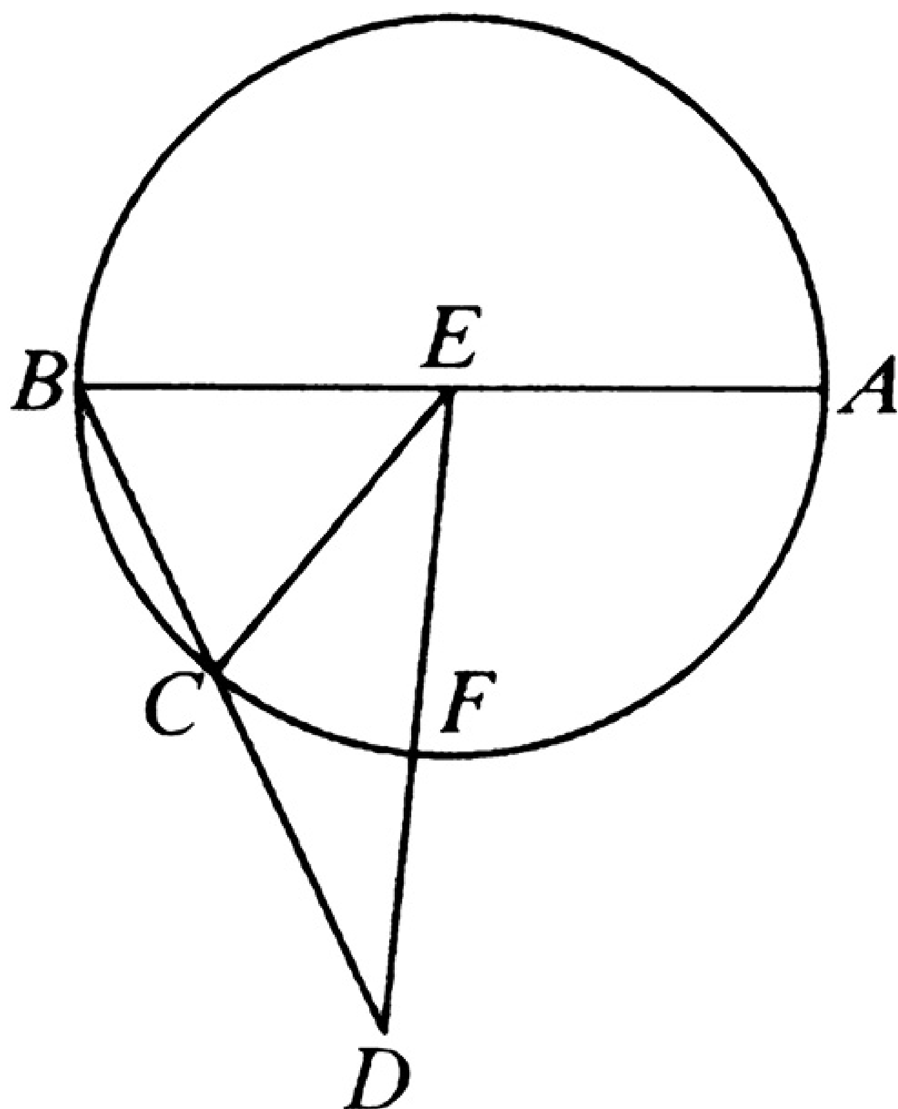
同理可证：*AC*被点*H*分为中外比，它的大线段*CH*等于五边形的边。

证完。

命题9

…

假如在同圆内把内接正六边形的一边与内接正十边形的一边加在一起，那么可将此两边的和分成中外比，并且它的大线段是正六边形的一边。



设：已知圆*ABC*，而*BC*是内接于圆*ABC*的正十边形的边，*CD*是内接正六边形的边，

假设它们在同一直线上。

那么可以说：分*BD*成中外比，*CD*是它的较大线段。

设：圆心为E，连接EB、EC、ED，

延长BE到A。

因为：BC是等边十边形的边，

所以：弧ACB是五倍的弧BC，

因此：弧AC是四倍的弧CB。

因为：弧AC比弧BC如同角AEC比角CEB，[VI. 33]

因此：角AEC是角ECB的四倍。

因为：角EBC等于角ECB，[I. 5]

所以：角AEC是角ECB的二倍。[I. 32]

因为：线段EC等于CD，

并且它们都等于圆ABC中内接正六边形的一边，[IV. 15，推论]

且角CED等于角CDE。[I. 5]

所以：角ECB是角EDC的二倍。[I. 32]

又因，已经证明：角AEC是角ECB的二倍，

因此：角AEC是EDC的四倍。

又因，已经证明：角AEC是角BEC的四倍，

因此：角EDC等于角BEC。

因为：角EBD是两个三角形BEC和BED的公共角，

所以：其余的角BED等于其余的角ECB，[I. 32]

因此：三角形EBD和三角形EBC的各角相等，

因此，有比例：DB比BE如同EB比BC。[VI. 4]

又因：EB等于CD，

所以：BD比DC如同DC比CB，

并且BD大于DC，

因此：DC大于CB，

所以：线段BD被分成中外比，并且DC是较大的一段。

证完。

命题10

…

假如有一个内接于圆的等边五边形，那么其中一个边上的正方形等于同圆的内接六边形一边上的正方形与内接十边形一边上的正方形的和。

设：等边五边形$ABCDE$内接于圆$ABCDE$中。

那么可以说：五边形$ABCDE$一边上的正方形等于内接于圆$ABCDE$的正六边形一边上的正方形与十字形一边上的正方形的和。

设：F为圆心，

连接AF并延长至点G，连接FB。

从F作直线FH垂直于AB，并且交圆于K。

连接AK、KB。

再从F作直线FL垂直于AK，并且交圆于M，连接KN。

因为：弧$ABCG$等于弧$AEDG$，弧ABC等于AED，

因此：余下的弧CG等于余下的弧GD。

因为：CD属于五边形，

因此：CG属于十边形。

因为：FA等于FB，并且FH是垂线，

所以：角AFK等于角KFB，[I. 5，I. 26]

因此：弧AK等于KB，[III. 26]

因此：弧AB是弧BK的二倍，

所以：线段AK是十边形的一边。

同理：AK也是KM的二倍。

因为：弧AB是弧BK的二倍，

且弧CD等于弧AB，

因此：弧CD等于弧BK的二倍。

因为：弧CD等于CG的二倍，

因此：弧CG等于弧BK。

因为：KA是KM的二倍，

所以：BK是KM的二倍，

因此：CG是KM的二倍。

因为：弧CB等于BA，

因此：弧CB是弧BK的二倍，

所以：整体弧BG也是BM的二倍，

因此：角GFB也是角BFM的二倍。[VI. 33]

因为：角FAB等于角ABF，

因此：角GFB是角FAB的二倍，

因此：角BFN等于角FAB。

因为：角ABF是两个三角形ABF、BFN的公共角，

所以：其余的角AFB等于其余的角BNF，[I. 32]

因此：三角形ABF与三角形BNF是等角的，

那么，有比例：线段AB比BF如同FB比BN，[VI. 4]

因此：矩形AB、BN等于BF上的正方形。[VI. 17]

因为：AL等于LK，

并且LN是公共的且和它们成直角，

所以：底KN等于底AN，[I. 4]

因此：角LKN等于角LAN。

因为：角LAN等于角KBN，

因此：角LKN等于角KBN。

因为：在A处的角是两三角形AKB、AKN的公共角，

所以：其余的角AKB等于其余的角KNA，[I. 32]

因此：三角形KBA与三角形KNA是等角的，

那么，有比例：线段BA比AK如同KA比AN，[VI. 4]

因此：矩形BA、AN等于AK上的正方形。[VI. 17]

又因，已经证明：矩形AB、BN等于BF上的正方形，

因此：矩形AB、BN与矩形BA、AN的和，也就是BA上的正方形

[II. 2]，等于BF上的正方形与AK上的正方形的和，

并且BA是五边形的一边，BF是六边形的一边，[IV. 15，推论]

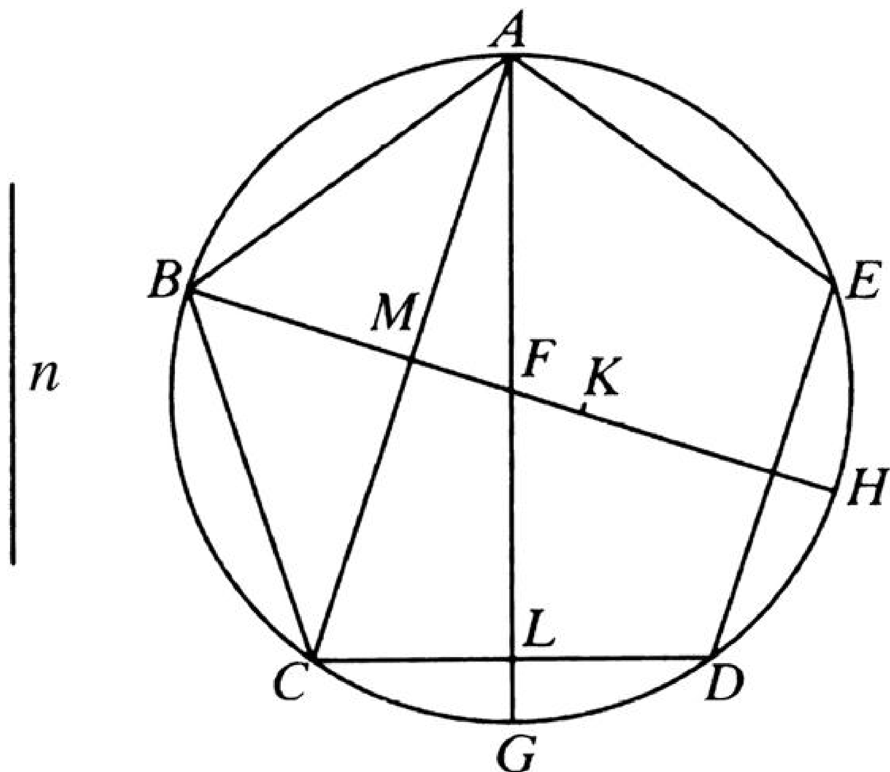
以及AK是十字形的一边。

证完。

命题11

…

假如一个等边五边形内接于一个有理直径的圆，那么五边形的边是被称为次线的无理线段。



设：圆$ABCDE$的直径是有理的，等边五边形$ABCDE$内接于它。

那么可以说：五边形的边是被称为次线的无理线段。

设：以F为圆心，连接AF、FB，延长至点G、H，连接AC。

作FK是AF的四分之一。

因为：AF是有理的，

所以：FK也是有理的。

因为：BF是有理的，

因此：整体BK也是有理的，

因为：弧ACG等于弧ADG，在它们中ABC等于AED，

因此：其余的CG等于其余的GD。

连接AD，

那么：在点L处的角是直角，并且CD是CL的二倍。

同理：在M处的角是直角，并且AC是CM的二倍。

因为：角ALC等于角AMF，

并且角LAC是两个三角形ACL与AMF的公共角，

因此：余下的角ACL等于余下的角MFA，

因此：三角形ACL与三角形AMF是等角的，

因此，有比例：LC比CA如同MF比FA。

取定两前项的二倍，

那么：CL的二倍比CA如同MF的二倍比FA。

因为：MF的二倍比FA如同MF比FA的一半，

因此：LC的二倍比CA如同MF比FA的一半，

再取定两后项的一半，

那么：LC的二倍比CA的一半等于MF比FA的四分之一，

并且DC是LC的二倍，CM是CA的一半，以及FK是FA的四分之一，

因此：DC比CM如同MF比FK。

由合比：DC、CM的和比CM如同MK比KF，[V. 18]

因此：DC、CM的和上的正方形比CM上的正方形如同MK上的正方形比KF上的正方形。

因为：当五边形两相对角的连线AC被分为中外比时，它较大的一段是五边形的边，也就是DC，[XIII. 8]

因为：较大一段和整体一半的和上的正方形是整体一半上的正方形的五倍，[XIII. 1]

并且CM是整体AC的一半，

因此：DC、CM的和上的正方形是CM上的正方形的五倍。

又因，已经证明：DC、CM的和上的正方形比CM上的正方形如同MK上的正方形比KF上的正方形，

因此：MK上的正方形是KF上的正方形的五倍。

因为：KF的直径是有理的，

因此：KF上的正方形是有理的，

因此：MK上的正方形也是有理的，

所以：MK是有理的。

因为：BF是FK的四倍，

因此：BK是五倍的KF，

所以：BK上的正方形是KF上的正方形的二十五倍，

并且MK上的正方形是五倍的KF上的正方形，

那么：BK上的正方形与KM上的正方形的比不同于平方数比平方数，

所以：BK与KM是长度不可公度的。[X. 9]

因为：它们每个都是有理的，

因此：BK、KM是仅正方可公度的两条有理线段。

设：从一条有理线段减去一条与它仅正方可公度的有理线段，

那么：它们的差是一条无理线段，也就是一条余线，

因此：MB是一条余线，加在它上面的是MK。[X. 73]

接下来可以证明：MB也是第四余线。

设：n上的正方形等于BK上的正方形与KM上的正方形的差，

因此：BK上的正方形与KM上的正方形的差等于n上的正方形。

因为：KF与FB是可公度的，

由合比：KB与FB是可公度的，[X. 15]

又因：BF与BH是可公度的，

因此：BK与BH是可公度的。[X. 12]

因为：BK上的正方形是KM上的正方形的五倍，

所以：BK上的正方形与KM上的正方形之比为5比1，

因此，由反比：BK上的正方形与n上的正方形之比为5比4，[V. 19，推论]

并且这不是平方数比平方数，

因此：BK与n不可公度，[X. 9]

所以：BK上的正方形与KM上的正方形的差正方形的边与BK是不可公度的。

因为：整体BK上的正方形与所加KM上的正方形的差正方形的边与BK是不可公度的，

并且整体BK与有理线段BH是可公度的，

因此：MB是第四余线。[X. 定义III. 4]

因为：由有理线段和一条第四余线围成的矩形是无理的，并且它的正方形的边是无理的，并且被称为次线，[X. 94]

又因：AB上的正方形等于矩形HB、BM，

当连接AH时，三角形ABH与三角形ABM是等角的，并且HB比BA如同AB比BM，

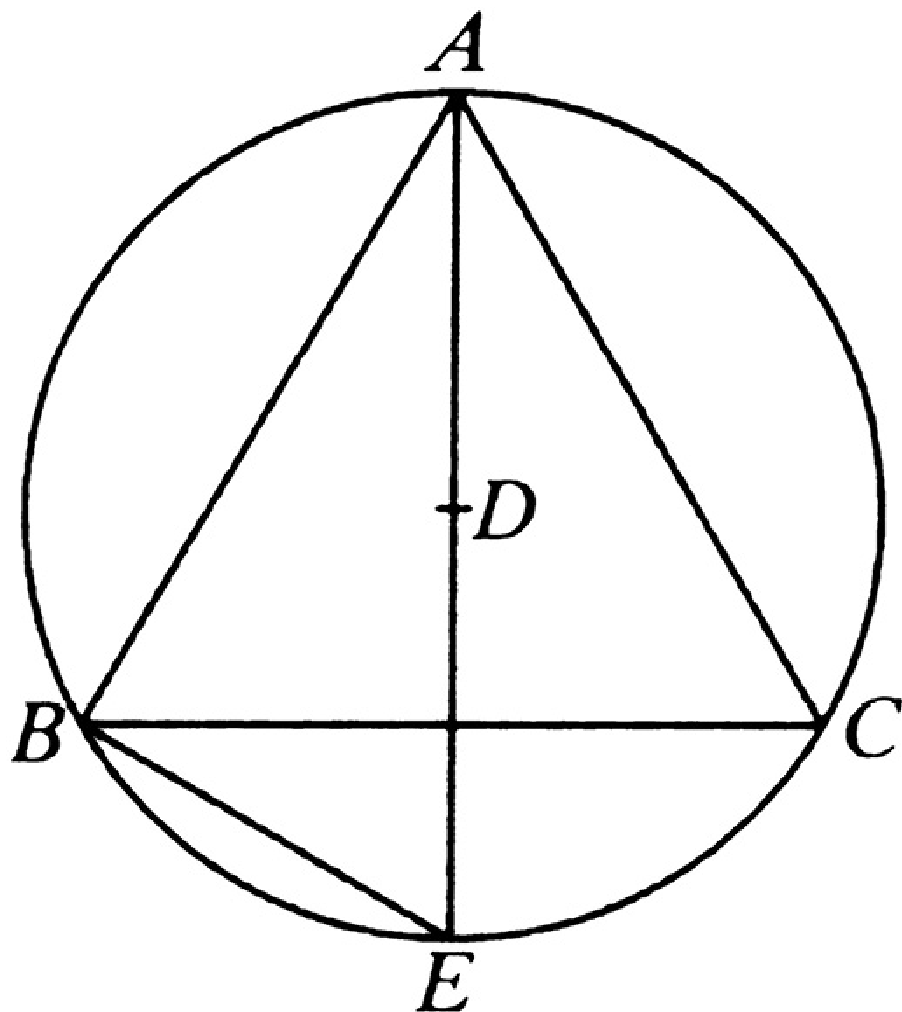
因此：五边形的边AB是一条被称为次线的无理线段。

证完。

命题12

…

假如一个等边三角形内接于一个圆，那么三角形一边上的正方形是圆的半径上的正方形的三倍。



设：等边三角形ABC内接于圆ABC。

那么可以说：三角形ABC一边上的正方形是圆半径上的正方形的三倍，

设：D是圆ABC的圆心，连接AD，延长至点E，连接BE。

因为：三角形ABC是等边的，

因此：弧BEC是圆周ABC的三分之一，

因此：弧BE是圆周的六分之一，

并且线段BE属于六边形，

所以：它等于半径DE。[IV. 15，推论]

因为：AE是DE的二倍，AE上的正方形是ED上的正方形的四倍，也就是BE上的正方形，

又因：AE上的正方形是AB、BE上的正方形的和，[III. 31，I. 47]

因此：AB、BE上的正方形的和是BE上的正方形的四倍，

因此，由分比：AB上的正方形是BE上的正方形的三倍。

又因：BE等于DE，

所以：AB上的正方形是DE上的正方形的三倍，

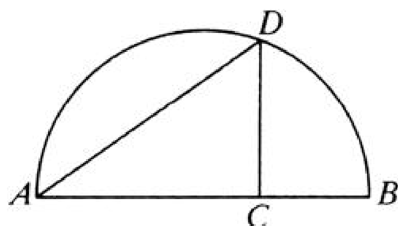
因此：三角形边上的正方形是半径上的正方形的三倍。

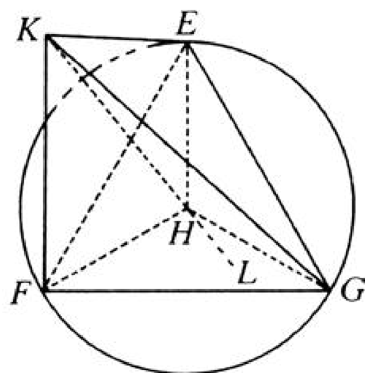
证完。

命题13

…

在已知球内作内接棱锥，并且证明球直径上的正方形是棱锥一边上的正方形的一倍半。





设：已知球的直径为AB，且它被点C分成AC和CB，而AC是CB的二倍。

设：AB上的半圆为ADB，从点C作直线CD与AB成直角，连接DA；

且圆EFG的半径等于DC，

等边三角形EFG内接于圆EFG。[IV. 2]

已知圆的圆心为H，[III. 1]

连接EH、HF、HG。

从点H作HK与圆EFG所在的平面成直角。[XI. 12]

在HK上截取一段HK等于线段AC，连接KE、KF、KG。

因为：KH与圆EFG所在的平面成直角，

因此：它也和圆EFG所在的平面上一切与它相交的直线成直角。[XI. 定义3]

因为：线段HE、HF、HG和它相交，

因此：HK和线段HE、HF、HG的每一条都成直角。

因为：AC等于HK，并且CD等于HE，它们夹着直角，

所以：底DA等于底KE。[I. 4]

同理：线段KF、KG等于DA，

因此：三条线段KE、KF、KG彼此相等。

因为：AC是CB的二倍，

因此：AB是BC的三倍。

因为：AB比BC如同AD上的正方形比DC上的正方形，

所以：AD上的正方形是DC上的正方形的三倍。

因为：FE上的正方形也是EH上的正方形的三倍，[XIII. 12]

并且DC等于EH，

因此：DA等于EF。

又因，已经证明：DA等于线段KE、KF、KG的每一条，

因此：线段EF、FG、GE的每一条等于线段KE、KF、KG的每一条，

所以：四个三角形EFG、KEF、KFG、KEG是等边的，

因此：由四个等边三角形构成了一个棱锥，三角形EFG是它的底并且点K是它的顶点。

接下来，要求：它内接于已知球。

并且需要证明，球直径上的正方形是这棱锥一边上的正方形的一倍半。

设：延长直线KH成直线HL，取HL等于CB。

因为：AC比CD如同CD比CB，[VI. 8，推论]

因为：AC等于KH，并且CD等于HE，以及CB等于HL，

因此：KH比HE如同EH比HL，

因此：矩形KH、HL等于EH上的正方形，[VI. 17]

并且角KHE、EHL的每一个都是直角，

因此：作在KL上的半圆也经过E。[VI. 8，III. 31]

如果KL固定，使半圆由原来位置旋转到开始位置，它也经过点F、G。

连接FL、LG。

那么：在F、G处的是直角，并且棱锥内接于已知球。

因为：球的直径KL等于已知球的直径AB、KH等于AC，并且HL等于CB，

那么，接下来可以证明：球的直径上的正方形是棱锥一边上的正方形的一倍半。

因为：AC是BC的二倍，

因此：AB是BC的三倍，

由反比：BA是AC的一倍半。

因为：BA比AC如同BA上的正方形比AD上的正方形，

因此：BA上的正方形也是AD上的正方形的一倍半，

并且BA是已知球的直径，AD等于棱锥的边，

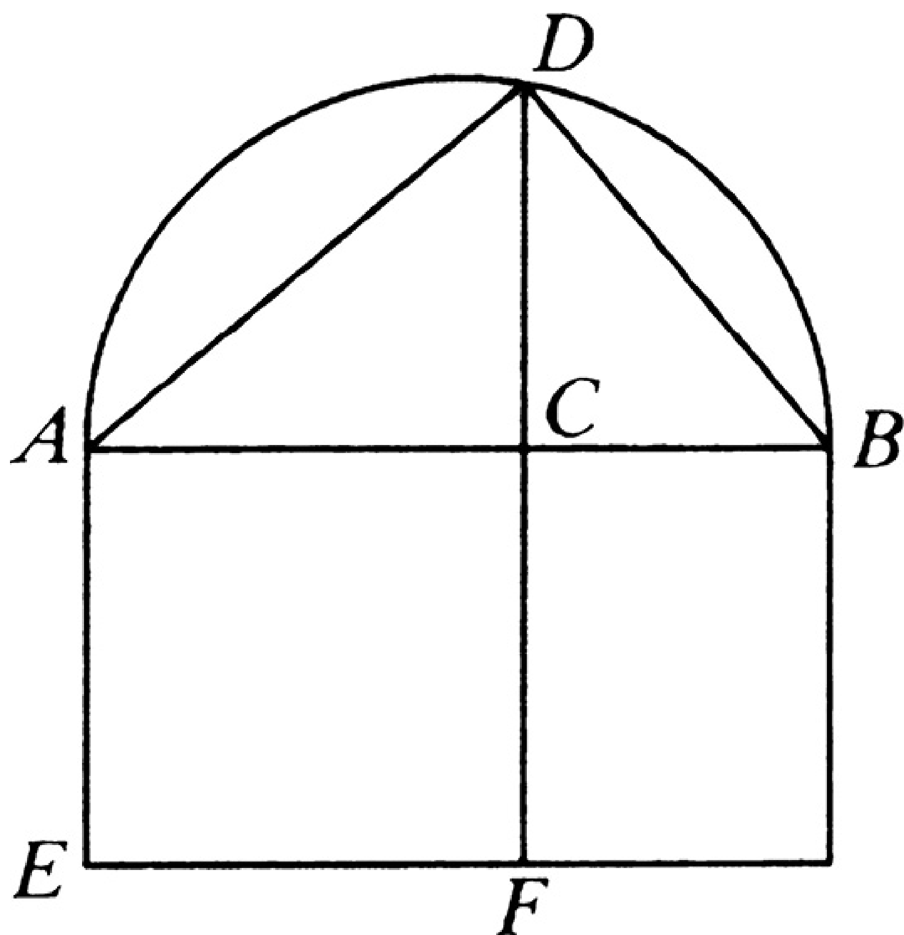
因此：这个球的直径上的正方形是棱锥边上的正方形的一倍半。

证完。

引理

…

证明，**AB**比**BC**如同**AD**上的正方形比**DC**上的正方形。



设：半圆已作成，连接*DB*；

在*AC*上作正方形*EC*，作平行四边形*FB*。

因为：三角形*DAB*与三角形*DAC*是等角的，

并且*BA*比*AD*如同*DA*比*AC*，[VI. 8，VI. 4]

所以：矩形*BA*、*AC*等于*AD*上的正方形。[VI. 17]

因为：*AB*比*BC*如同*EB*比*BF*，[VI. 1]

并且*EB*是矩形*BA*、*AC*，

因为：*EA*等于*AC*，并且*BF*是矩形*AC*、*CB*，

因此：AB比BC如同矩形BA、AC比矩形AC、CB。

因为：矩形BA、AC等于AD上的正方形，并且矩形AC、CB等于DC上的正方形，

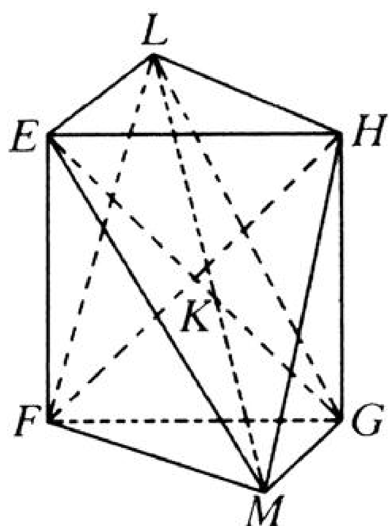
并且垂线DC是底的线段AC、CB的比例中项，这是因为角ADB是直角，[VI. 8，推论]

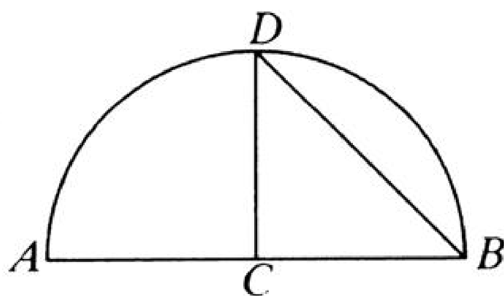
因此：AB比BC如同AD上的正方形比DC上的正方形。

命题14

…

如前情况，作一个球的内接八面体，证明球直径上的正方形是八面体一边上的正方形的二倍。





设：已知球的直径为AB，并被二等分于点C；

在AB上作半圆ADB。

从C作CD与AB成直角，连接DB；

设：正方形$EFGH$的每条边等于DB，连接HF、EG。

从点K作直线KL和正方形$EFGH$所在平面成直角。[XI. 12]

并且使它穿过平面到另一侧，取线段KM。

在直线KL、KM上分别截取KL、KM使它们等于线段EK、FK、GK、HK的每一条，

连接LE、LF、LG、LH、ME、MF、MG、MH。

因为：KE等于KH，并且角EKH是直角，

因此：HE上的正方形是EK上的正方形的二倍。[I. 47]

因为：LK等于KE，且LKE是直角，

因此：EL上的正方形是EK上的正方形的二倍。[I. 47]

又因，已经证明：HE上的正方形是EK上的正方形的二倍，

因此：LE上的正方形等于EH上的正方形，

因此：LE等于EH。

同理：LH等于HE，

所以：三角形LEH是等边的。

同理可证：以正方形$EFGH$的边为底且以点L、M为顶点的其余的三角形每一个都是等边的。由此作出由八个等边三角形围成的八面体。

接下来，要求：它内接于已知球，并且证明球直径上的正方形是八面体边上的正方形的二倍。

因为：三条线段LK、KM、KE彼此相等，

因此：LM上的半圆也经过E。

同理：倘若固定LM，旋转半圆到原来位置，它也经过点F、G、H，从而八面体内接于一个球。

接下来证明：它也内接于已知球。

因为：*LK*等于*KM*，

*KE*是公共的，它们夹着直角，

因此：底*LE*等于底*EM*。[I. 4]

因为：角*LEM*是直角，并且它在半圆上，[III. 31]

因此：*LM*上的正方形是*LE*上的正方形的二倍。[I. 47]

因为：*AC*等于*CB*，求*AB*是*BC*的二倍，

因为：*AB*比*BC*如同*AB*上的正方形比*BD*上的正方形，

因此：*AB*上的正方形是*BD*上的正方形的二倍。

又因，已经证明：*LM*上的正方形是*LE*上的正方形的二倍，

并且*DB*上的正方形等于*LE*上的正方形，这是因为*EH*等于*DB*，

因此：*AB*上的正方形等于*LM*上的正方形，

所以：*AB*等于*LM*。

又因：*AB*是已知球的直径，

因此：*LM*等于已知球的直径，

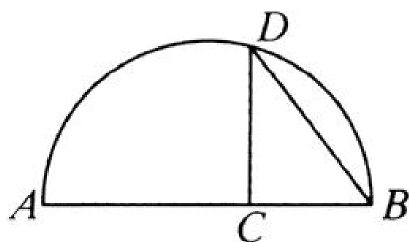
所以：在已知球内作了八面体，同时证明了球直径上的正方形是八面体边上的正方形的二倍。

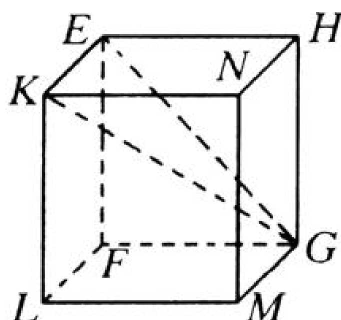
证完。

命题15

…

像作棱锥一样，求作一个球的内接立方体，并且证明球直径上的正方形是立方体一边上的正方形的三倍。





设：已知球的直径是*AB*，且*C*分*AB*，使*AC*是*CB*是二倍。

在*AB*上作半圆*ADB*，从*C*作*CD*与*AB*成直角。

连接*DB*；

设：正方形*EFGH*的边等于*DB*。

从*E*、*F*、*G*、*H*作*EK*、*FL*、*GM*、*HN*与正方形*EFGH*所在的平面成直角。

在*EK*、*FL*、*GM*、*HN*上分别截取*EK*、*FL*、*GM*、*HN*等于线段*EF*、*FG*、*GH*、*HE*的每一条。

连接*KL*、*LM*、*MN*、*NK*。

由此作了立方体*FN*，由六个相等的正方形围成。

证明：此立方体内接于已知球，并且球直径上的正方形是此立方体一边上的正方形的三倍。

设：连接*KG*、*EG*。

因为：*KE*与平面*EG*成直角，

所以：角*KEG*是直角，和直线*EG*也成直角，[XI. 定义3]

因此：KG上的半圆也过点E。

因为：GF与FL、FE的每一条都成直角，GF也与平面FK成直角，

因此：假如FK、GF与FK成直角，那么在GK上再作半圆也过F。

同理：它也过立方体其余的顶点。

设：固定KG，使半圆旋转到开始位置，

那么：此立方体内接于一个球。

接下来可以证明：它也内接于已知球。

因为：GF等于FE，并且在F处的角是直角，

因此：EG上的正方形是EF上的正方形的二倍。

因为：EF等于EK，

因此：EG上的正方形是EK上的正方形的二倍，

所以：GE、EK上的正方形的和，也就是GK上的正方形，是EK上的正方形的三倍。[I. 47]

因为：AB是BC的三倍，

并且AB比BC如同AB上的正方形比BD上的正方形，

因此：AB上的正方形是BD上的正方形的三倍。

又因，已经证明：GK上的正方形是KE上的正方形的三倍，

且KE等于DB，

因此：KG等于AB。

因为：AB是已知球的直径，

因此：KG等于已知球的直径，

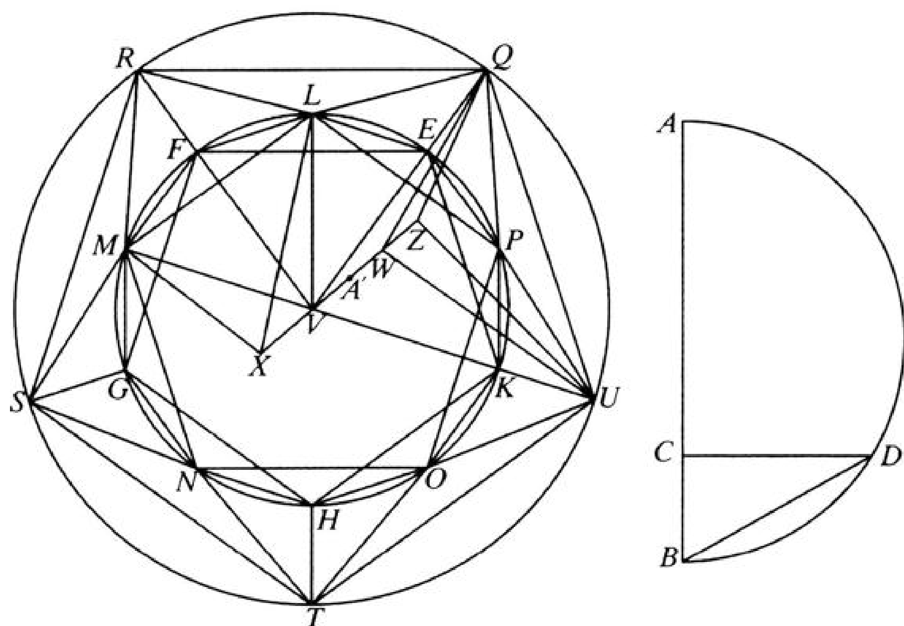
因此：给已知球作了内接立方体，同时证明了球直径上的正方形是立方体一边上的正方形的三倍。

证完。

命题16

…

与前面一样，作一个球的内接二十面体，证明这二十面体的边是被称为次线的无理线段。



设：已知球的直径*AB*，点*C*分*AB*，使*AC*是*CB*的四倍。

在*AB*上作半圆*ADB*，从*C*作直线*CD*和*AB*成直角，连接*DB*。

而圆*EFGHK*的半径等于*DB*。

设：等边且等角的五边形*EFGHK*内接于圆*EFGHK*。

设：点*L*、*M*、*N*、*O*、*P*二等分弧*EF*、*FG*、*GH*、*HK*、*KE*。

连接LM、MN、NO、OP、PL、EP，

因此：五边形$LMNOP$是等边的，线段EP是十边形的边。

设：从点E、F、G、H、K作直线EQ、FR、GS、HT、KU与圆所在的平面成直角，它们等于圆$EFGHK$的半径，

连接QR、RS、ST、TU、UQ、QL、LR、RM、MS、SN、NT、TO、OU、UP、PQ。

因为：线段EQ、KU都与同一平面成直角，

因此：EQ平行于KU。[XI. 6]

又因：它们也相等，

且连接相等且平行线段的端点的线段，在同一方向相等且平行，[I. 33]

因此：QU等于且平行于EK。

又因：EK是等边五边形的边，

因此：QU也是内接于圆$EFGHK$的内接等边五边形的边。

同理：线段QR、RS、ST、TU都是圆$EFGHK$的内接等边五边形的边，

因此：五边形$QRSTU$是等边的，

因为：QE属于六边形，EP属于十边形，角QEP是直角，

因此：QP属于五边形。

因为：内接于同一圆的五边形边上的正方形等于六边形边上的正方形与十边形边上的正方形的和，[XIII. 10]

同理：PU也是五边形的边，

又因：QU属于一个五边形，

因此：三角形QPU是等边的。

同理：三角形QLR、RMS、SNT、TOU的每一个也是等边的，

又因，已经证明：线段QL、QP的每一个条都属于一个五边形，LP也属于一个五边形，

因此：三角形QLP是等边的。

同理：三角形LRM、MSN、NTO、OUP的每一个也是等边的。

设：取定圆$EFGHK$的圆心为点V，

从点V作VZ与圆所在的平面成直角，在另一方向延长它成VX。

截取VW，使它为六边形的一边，线段VX、WZ的每一条是十边形的一边。

连接QZ、QW、UZ、EV、LV、LX、XM。

因为：线段VW、QE都与圆所在的平面成直角，

因此：VW平行QE。[XI. 6]

又因：它们也相等，

因此：EV、QW相等且平行。[I. 33]

因为：EV属于一个六边形，

因此：QW也属于一个六边形。

又因：QW属于一个六边形，

并且WZ属于一个十边形，角QWZ是直角，

因此：QZ属于一个五边形。[XIII. 10]

假如连接VK、WU，它们相等且相对的，

同理：UZ也属于一个五边形。

因为：VK是半径，属于一个六边形，[IV. 15，推论]

因此：WU也属于一个六边形。

因为：WZ属于一个十边形，角UWZ是直角，

因此：UZ属于一个五边形。[XIII. 10]

又因：QU属于一个五边形，

因此：三角形QUZ是等边的。

同理：其余的以线段QR、RS、ST、TU为底且以Z为顶点的三角形也是等边的。

因为：VL属于一个六边形，VX属于一个十边形，角LVX是直角，

因此：LX属于一个正方形。[XIII. 10]

同理：假如连接MV，它属于一个六边形，可以推出MX属于一个五边形。

因为：LM属于一个五边形，

所以：三角形LMX是等边的。

同理可证：以线段MN、NO、OP、PL为底且以点X为顶点的三角形都是等边的，

因此：已经作了由二十个等边的三角形构成的一个二十面体。

接下来，要求：二十面体内接于已知球，证明二十面体的边是被称为次线的无理线段。

因为：VW属于一个六边形，WZ属于十边形，

因此：VZ被W分为中外比，VW是较大的线段，[XIII. 9]

所以：ZV比VW如同VW比WZ。

因为：VW等于VE，并且WZ等于VX，

因此：ZV比VE如同EV比VX。

因为：角ZVE、EVX是直角，

又因：三角形XEZ与VEZ相似，

因此：假如连接EZ、XZ，那么XEZ是直角。

同理：由于ZV比VW如同VW比WZ，ZV等于XW，并且VW等于WQ，

因此：XW比WQ如同QW比WZ。

同理：假如连接QX，

那么：在Q处的角是直角，[VI. 8]

因此：XZ上的半圆经过Q。[III. 31]

设：固定XZ，使此半圆旋转到开始位置，它也经过点Q并且过二十面体的其余的顶点，

因此：二十面体内接于一个球。

接下来可以证明：它也内接于已知球。

设：A'二等分VW。

因为：线段VZ被W分为中外比，ZW是较小的一段，

因此：ZW为大线段的一半，也就是WA'上的正方形是大线段一半上的正方形的五倍，[XIII. 3]

因此：ZA'上的正方形是$A'W$上的正方形的五倍。

又因：ZX是ZA'的二倍，而VW是$A'W$的二倍，

因此：ZX上的正方形是WV上的正方形的五倍。

因为：AC是CB的四倍，

因此：AB是BC的五倍。

因为：AB比BC如同AB上的正方形比BD上的正方形，[VI. 8，V. 定义9]

因此：AB上的正方形是BD上的正方形的五倍。

又因，已经证明：ZX上的正方形是VW上的正方形的五倍，

且DB等于VW，

并且它们的每一个等于圆$EFGHK$的半径，

因此：AB等于XZ。

因为：AB是已知球的直径，

因此：XZ等于已知球的直径，

因此：这二十面体内接于已知球。

接下来可以证明：这二十面体的边是被称为次线的无理线段。

因为：球的直径是有理的，它上的正方形是圆$EFGHK$半径上的正方形的五倍，

因此：圆$EFGHK$的半径也是有理的，

所以：它的直径也是有理的。

又因：倘若一个等边五边形内接于一个直径是有理的圆，

那么：五边形的边是被称为次线的无理线段。[XIII. 11]

因为：这五边形*EFGHK*的边是二十面体的边，

因此：二十面体的边是被称为次线的无理线段。

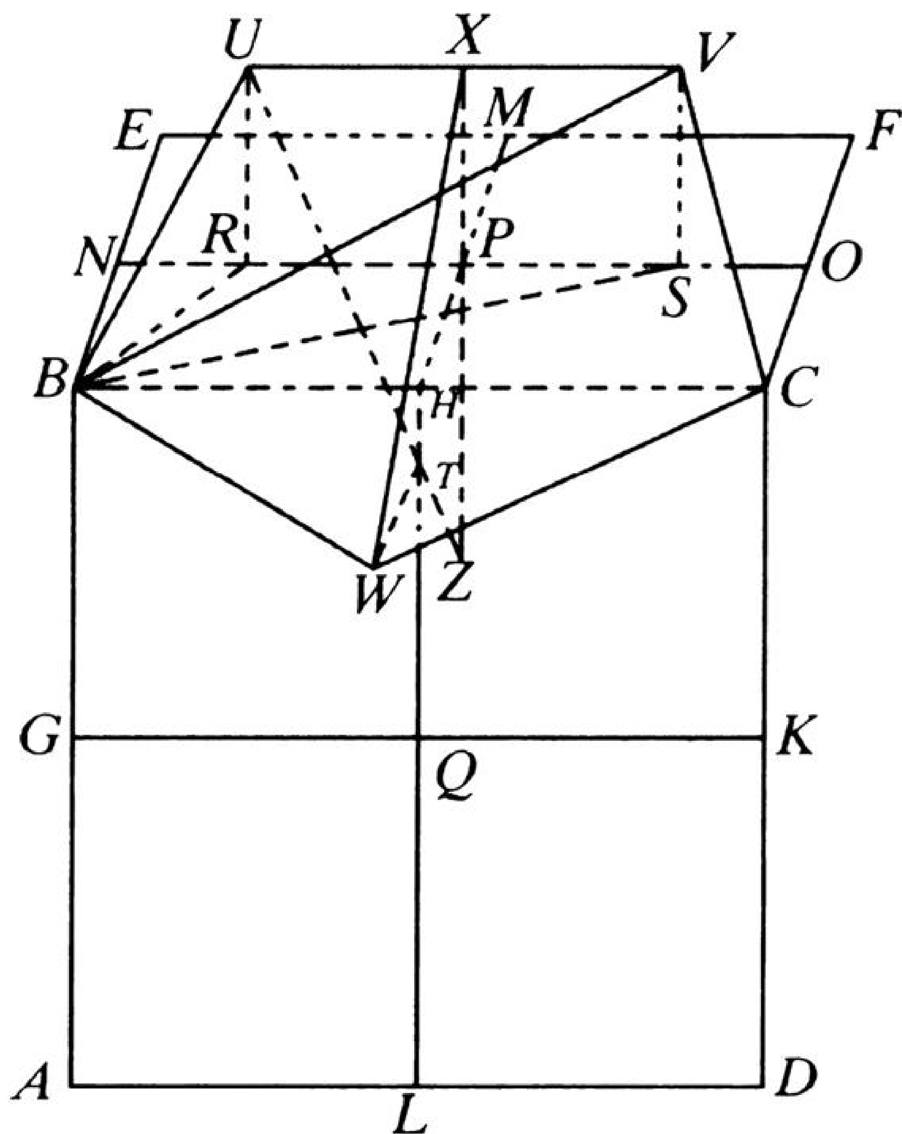
证完。

推论　此球直径上的正方形是内接二十面体得出的（顶点所在五个三角形的外接圆的）圆半径上的正方形的五倍，并且球的直径是内接于同圆内的六边形一边与十边形两边的和。

命题17

…

与前面一样，求作已知球的内接十二面体，证明这十二面体的边是被称为余线的无理线段。



设：*ABCD*、*CBEF*是前述立方体的互相垂直的两个面，且*G*、*H*、*K*、*L*、*M*、*N*、*O*分别二等分边*AB*、*BC*、*CD*、*DA*、*EF*、*EB*、*FC*。

连接*GK*、*HL*、*MH*、*NO*，

设：点*R*、*S*、*T*分别分线段*NP*、*PO*、*HQ*成中外比；

且*RP*、*PS*、*TQ*是它们的较大线段。

从*R*、*S*、*T*向立方体外作*RU*、*SV*、*TW*与立方体的面成直角。

取它们等于RP、PS、TQ，连接UB、BW、WC、CV、VU。

那么可以说：五边形$UBWCV$是一个平面内的等边且等角的五边形。

连接RB、SB、VB。

那么：线段NP被R分为中外比，并且RP是较大的线段，

因此：PN、NR上的正方形的和是PS上的正方形的三倍。[XIII. 4]

因为：PN等于NB，且PR等于RU，

因此：BN、NR上的正方形的和是RU上的正方形的三倍。

因为：BR上的正方形等于BN、NR上的正方形的和，[I. 47]

因此：BR上的正方形是RU上的正方形的三倍，

因此：BR、RU上的正方形的和是RU上的正方形的四倍。

因为：BU上的正方形等于BR、RU上的正方形的和，

因此：BU上的正方形是RU上的正方形的四倍，

因此：BU是RU的二倍。

因为：VU也是UR的二倍，

且SR也是PR的二倍，也就是RU的二倍，

因此：BU等于UV。

同理可证：线段BW、WC、CV的每一条等于线段BU、UV的每一条，

因此：五边形$BUVCW$是等边的。

接下来可以证明：它也同在一个平面上。

设：从P向立方体外作PX平行于RU、SV的每一条，连接XH、HW。

那么可以说：XHW是一条直线。

因为：HQ被T分为中外比，且QT是较大的线段，

因此：HQ比QT如同QT比TH。

因为：HQ等于HP，并且QT等于线段TW、PX的每一条，

因此：HP比PX如同WT比TH。

因为：HP与TW的每一条都与平面BD成直角，

因此：HP平行于TW，[XI. 6]

因此：TH平行于PX。

因为：它们的每一条都与平面BF成直角，[XI. 6]

倘若两个三角形XPH、HTW，其中一个的两条边和另一个的两条边成比例。

设：将它们的边放在一起使角的顶点重合在一起，并且相应的边平行，

那么：其余的两边在一条直线上，[VI. 32]

因此：XH与HW在同一条直线上。

因为：每一条直线在同一个平面上，[XI. 1]

因此：五边形$UBWCV$在一平面上。

接下来可以证明：它也是等角的。

因为：线段NP被R分为中外比，且PR是较大的线段，PR等于PS，

因此：NS也被P分为中外比，

并且*NP*是较大的一段，[XIII. 5]

因此：*NS*、*SP*上的正方形的和是*NP*上的正方形的三倍。[XIII. 4]

因为：*NP*等于*NB*，且*PS*等于*SV*，

因此：*NS*、*SV*上的正方形的和是*NB*上的正方形的三倍，

所以：V*S*、*SN*、*NB*上的正方形的和是*NB*上的正方形的四倍。

因为：*SB*上的正方形等于*SN*、*NB*上的正方形的和，

因此：*BS*、*SV*上的正方形的和，也就是*BV*上的正方形，是*NB*上的正方形的四倍，这是因为角V*SB*是直角，

所以：*VB*是*BN*的二倍。

因为：*BC*是*BN*的二倍，

所以：*BV*等于*BC*。

因为：两边*BU*、*UV*等于两边*BW*、*WC*，并且底*BV*等于底*BC*，

所以：角*BUC*等于角*BWC*。[I. 8]

同理可证：角*UVC*等于角*BWC*，

所以：三个角*BWC*、*BUV*、*UVC*彼此相等。

又因：倘若一个等边五边形有三个角彼此相等，

那么：五边形是等角的，[XIII. 7]

因此：五边形*BUVCW*是等角的。

又因，已经证明：它是等边的，

因此：五边形*BUVCW*是等边且等角的，它在立方体的边*BC*上，

因此：倘若在立方体的十二条边的每一条上都同样作图，

那么：由十二个等边且等角的五边形构成一个立体图，叫作十二面体。

需要证明：它内接于已知球，并且这十二面体的边是被称为余线的无理线段。

设：延长XP成直线XZ，

那么：PZ与正方体的对角线相交，并且彼此平分。[XI. 38]

设：它们相交于Z，

那么：Z是立方体外接球的球心，并且ZP是立方体一边的一半。

设：连接UZ，

那么：P分线段NS为中外比，NP是较大一段，

因此：NS、SP上的正方形的和是NP上的正方形的三倍。[XIII. 4]

因为：NS等于XZ，

并且NP等于PZ，而XP等于PS，

又因：PS等于XU，

且PS等于RP，

因此：ZX、XU上的正方形的和是NP上的正方形的三倍。

因为：UZ上的正方形等于ZX、XU上的正方形的和，

因此：UZ上的正方形是NP上的正方形的三倍。

因为：外接于正方体的球的半径上的正方形也是立方体一边一半上的正方形的三倍，

已知如何作内接于球的立方体，

且已经证明：球的直径上的正方形是立方体一边上的正方形的三

倍，[XIII. 15]

因为：假如两整体相比，又如同两个半量的比，并且NP是立方体一边的一半，

因此：UZ等于外接于立方体的球的半径，并且Z是外接于立方体的球的球心，

因此：点U是这球面上的一点。

同理可证：十二面体其余的每一个角也在这球面上，

因此：十二面体内接于已知球。

接下来可以证明：十二面体的边是被称为余线的无理线段。

因为：当NP被分为中外比时，RP是较大的一段，

当PO被分成中外比时，PS是较大的一段，

因此：当整体NO被分成中外比时，RS是较大的一段。

（这是因为：NP比PR如同PR比RN，那么各二倍也是正确的，因为部分与部分的比等于它们同倍量的比，[V. 15]

因此：NO比RS如同RS比NR与SO的和。

因为：NO大于RS，

因此：RS大于NR与SO的和，

所以：NO被分为中外比，且RS是较大一段。）

因为：RS等于UV，

因此：当NO被分为中外比时，UV是较大的一段。

因为：球的直径是有理的，并且它上的正方形是正方体一边上的正方形的三倍，

因此：*NO*是正方体的一边，它是有理的，

（如果有理线段被分成中外比，那么所分的两部分都是余线的无理线段。）

因此：*UV*是十二面体的一边，是一个被称为余线的无理线段。[XIII. 6]

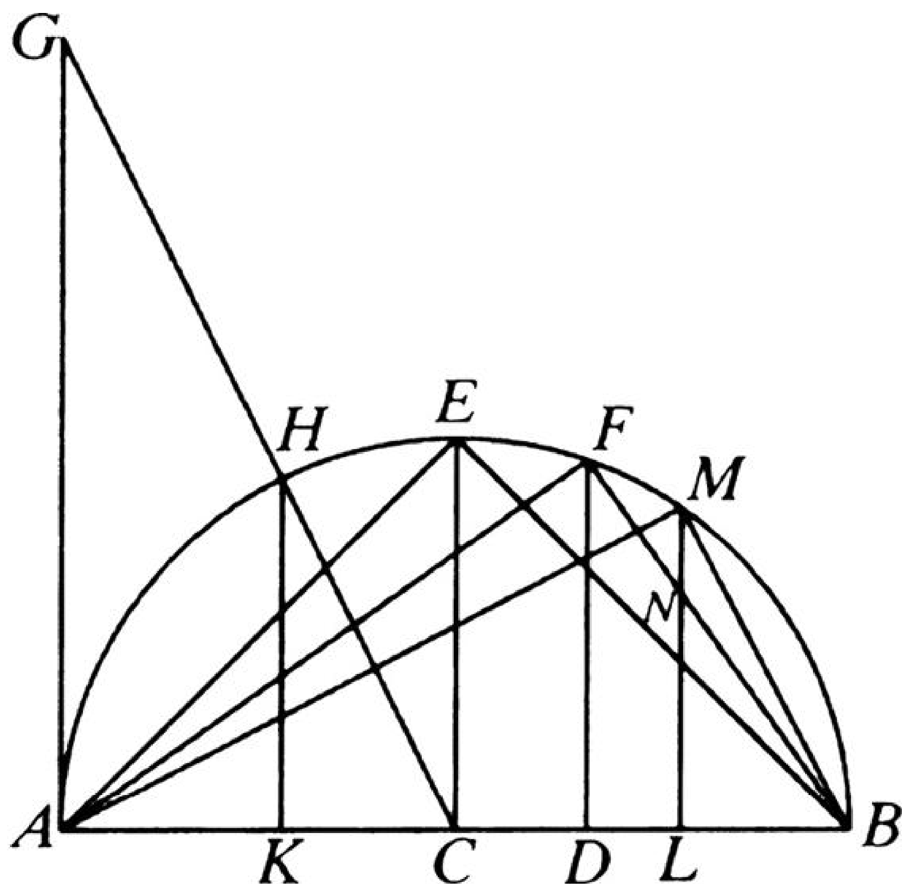
推论　当立方体的一边被分为中外比时，较大一段是十二面体的一边。

证完。

命题18

…

已知五种图形的边并把它们加以比较。



设：已知球的直径AB，而C把AB分成AC等于CB；

D把AB分成AD是DB的二倍。

设：AB上的半圆是AEB，

从C、D作CE、DF与AB成直角。

连接AF、FB、EB。

因为：AD是DB的二倍，

因此：AB是BD的三倍。

代换后：BA是AD的一倍半。

因为：BA比AD如同BA上的正方形比AF上的正方形，[V.　定义9，VI. 8]

并且三角形AFB与三角形AFD是等角的，

因此：BA上的正方形是AF上的正方形的一倍半。

因为：球直径上的正方形也是棱锥一边上的正方形的一倍半，[XIII. 13]

又因：AB是球的直径，

因此：AF等于棱锥的边。

因为：AD是DB的二倍，

因此：AB是BD的三倍。

因为：AB比BD如同AB上的正方形比BF上的正方形，[VI.　8，V.　定义9]

所以：AB上的正方形是BF上的正方形的三倍。

因为：球直径上的正方形也是立方体边上的正方形的三倍，[XIII. 15]

并且AB是球直径，

因此：BF是立方体的边。

因为：AC等于CB，

所以：AB是BC的二倍。

因为：AB比BC如同AB上的正方形比BE上的正方形，

因此：AB上的正方形是BE上的正方形的二倍。

又因：球直径上的正方形也是八面体边上的正方形的二倍，[XIII.

且AB是已知球的直径，

因此：BE是八面体的边。

接下来，由点A作AG与直线AB成直角，作AG等于AB，连接GC，由H作HK垂直AB。

因为：GA等于AC的二倍，

并且GA等于AB，且GA比AC如同HK比KC，

因此：HK也是KC的二倍，

所以：HK上的正方形是KC上的正方形的四倍，

因此：HK、KC上的正方形的和，也就是HC上的正方形是KC上的正方形的五倍。

因为：HC等于CB，

因此：BC上的正方形是CK上的正方形的五倍。

因为：AB是CB的二倍，在它们中，AD是DB的二倍，

因此：余量BD是余量DC的二倍，

所以：BC是CD的三倍，

因此：BC上的正方形是CD上的正方形的九倍。

因为：BC上的正方形是CK上的正方形的五倍，

因此：CK上的正方形大于CD上的正方形，

所以：CK大于CD。

设：CL等于CK，由L作LM与AB成直角，连接MB。

因为：BC上的正方形是CK上的正方形的五倍，

并且AB是BC的二倍，KL是CK的二倍，

因此：AB上的正方形是KL上的正方形的五倍。

因为：球直径上的正方形也是作出的二十面体圆半径上的正方形的五倍，[XIII. 16，推论]

并且AB是球的直径，

因此：KL是作出的二十面体的圆的半径，

因而：KL是所说圆的内接六边形的边。[VI. 15，推论]

因为：球的直径等于同圆中内接六边形一边与内接十边形两边的和，

又因：AB是球的直径，KL是六边形的一边，且AK等于LB，

因此：线段AK、LB的每一条都是二十面体的圆内接十边形的边。

因为：LB属于一个十边形，ML属于一个六边形，

且ML等于KL，它等于HK，这是因为距圆心等远，

线段HK、KL的每一条都是KC的二倍，

因此：MB属于五边形。[XIII. 10]

因为：五边形的一边是二十面体的一边，[XIII. 16]

所以：MB属于这个二十面体，

因为：FB是立方体的一边，

设：它被N分为中外比，且NB是较大一段，

因此：NB是十二面体的一边。[XIII. 17，推论]

又因，已经证明：球直径上的正方形是棱锥一边AF上的正方形的一倍半，也是八面体一边BE上正方形的二倍与立方体边FB的三倍，

因此：球直径上的正方形包含六部分，棱锥边上的正方形包含四部分，八面体一边上的正方体包含三部分，立方体一边上的正方形包含两部分，

因此：棱锥一边上的正方形是八面体一边上的正方形的三分之四，是立方体一边上的正方形的二倍，

并且八面体一边上的正方形是立方体一边上的正方形的一倍半。

因此：这三种图形，棱锥、八面体及立方体的边互比是有理比。

因为：其余的两种图形，也就是二十面体的边与十二面体的边互比不是有理比，与前面所说的边互比也不是有理比，

因为：它们是无理的，一条是次线，[XIII. 16]

另一是余线，[XIII. 17]

那么，能够证明：二十面体的边MB大于十二面体的边NB。

因为：三角形FDB与三角形FAB是等角的，[VI. 8]

有比例：DB比BF如同BF比BA。[VI. 4]

因为：三条线段成比例，

第一条比第三条如同第一条上的正方形比第二条上的正方形，[V. 定义9，VI. 20，推论]

因此：DB比BA如同DB上的正方形比BF上的正方形，

因此，由反比：AB比BD如同FB上的正方形比BD上的正方形。

因为：AB是BD的三倍，

所以：FB上的正方形是BD上的正方形的三倍。

因为：AD上的正方形也是DB上的正方形的四倍，

且AD是DB的二倍，

因此：AD上的正方形大于FB上的正方形，

因此：AD大于FB，

所以：AL更大于FB。

当AL被分为中外比时，KL是较大的一段，

因为：LK属于六边形，且KA属于十边形，[XIII. 9]

又，当FB被分为中外比时，NB是较大一段，

因此：KL大于NB，

又因：KL等于LM，

因此：LM大于NB，

所以：二十面体一边MB大于十二面体一边NB。

证完。

接下来可以证明，除上述五种图形外，再没其他的由等边及等角且彼此相等的面构成的图形。

因为，一个立体角不能由两个三角形或者两个平面构成。

由三个三角形构成棱锥的角，由四个三角形构成八面体的角，由五个三角形构成二十面体的角。

但是，不能把六个等边且等角的三角形一个顶点放在一起构成一个立体角。

因为，等边三角形的一个角是一个直角的三分之二，于是六个角将等于四个直角。

这是不符合实际的。

因为任何一个立体角都是由其和小于四直角的一些角构成的。[XI. 21]

同理，六个以上的平面角绝不能构成一个立体角。

由三个正方形构成立方体的角，但是四个正方形不能构成立体角，因为它们的和又是四个直角。

由三个等边且等角的五边形构成十二面体的角，但是由四个这样的角不能构成任何立体角。因为，一个等边五边形的角是直角的一又五分之一，于是四个角之和大于四个直角。

这是不符合实际的。

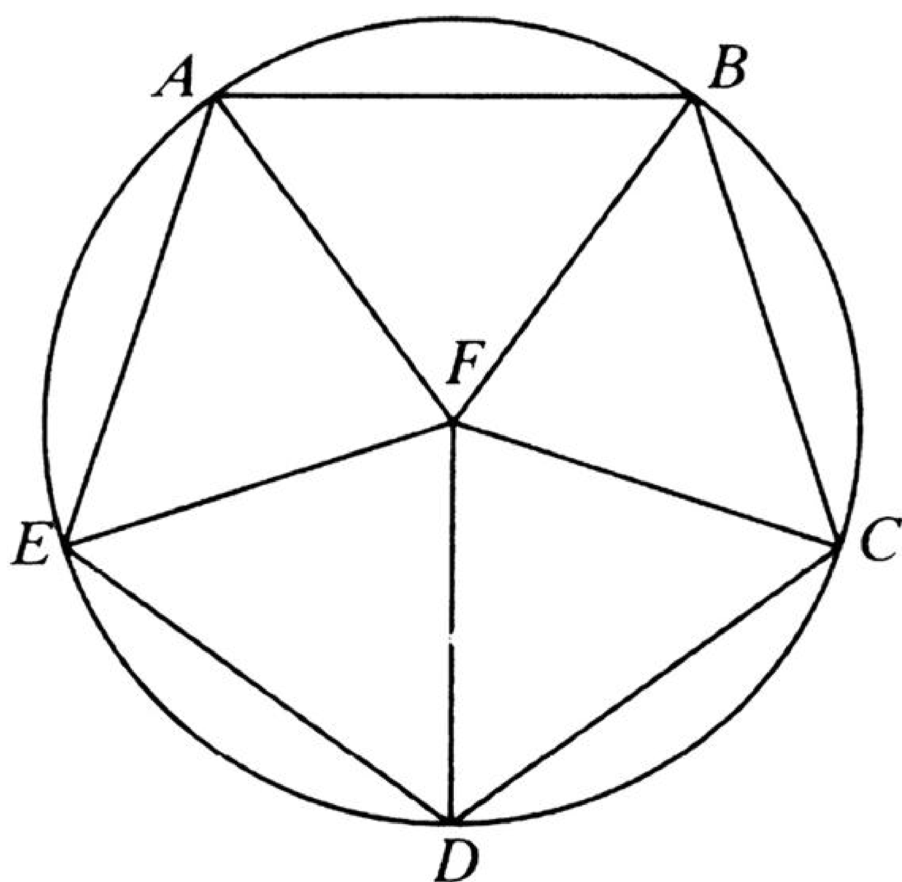
同理，不可能由另外的多边形构成立体角。

证完。

引理

…

证明等边且等角的五边形的角是一个直角的一又五分之一。



设：*ABCDE*是一个等边且等角的五边形，它的外接圆是圆*ABCDE*，它的圆心为*F*，连接*FA*、*FB*、*FC*、*FD*、*FE*，

因此：它们在*A*、*B*、*C*、*D*、*E*点二等分五边形的各角。

因为：在点*F*处的各角的和等于四直角，且它们相等，

所以：它们的每一个，如角*AFB*，是一个直角的五分之四，

因此：其余各角*FAB*、*ABF*的和为一角的一又五分之一。

因为：角*FAB*等于角*FBC*，

因此：五边形的一个整体角*ABC*是一个直角的一又五分之一。

证完。

版权信息

书名：几何原本

作者：(古希腊) 欧几里得

出版社：天津科学技术出版社

出版时间：2020年7月

ISBN：978-7-5576-8259-0

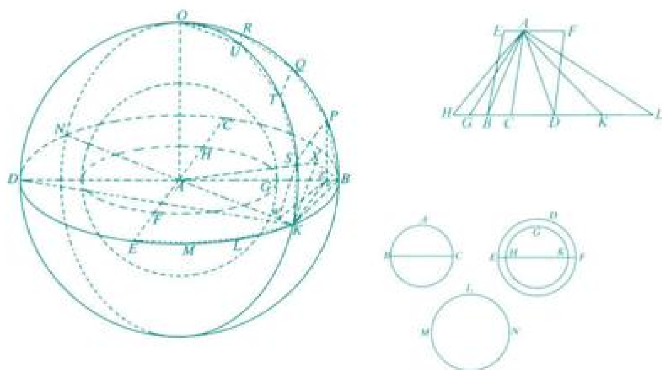
版权所有·侵权必究

紫图书库 8026
大师经典 027

出版1000次，流传之广，仅次于《圣经》

几何基础、几何与代数、圆与角、比例与算术、相似多边形、立体几何……

130余条定义，465道命题，《几何原本》发明了世界中并不存在的点、线、面，人类由此设计自己的世界

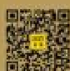


当一个人最初接触欧几里得几何学时，如果不曾为它的明晰性和可靠性所感动，那么他是不会成为一个科学家的。

——爱因斯坦

能精此书者，无一事不可精；好学此书者，无一事不可学。

——徐光启



紫图图书



上架建议：畅销·科普·数学
ISBN 978-7-5576-8259-0
定价：89.90 元



George Gamow

One Two Three

......



横跨世纪的
头脑风暴
当代青年的
知识标配

Infinity

从一到无穷大

科学中的事实和猜测

[美] 乔治·伽莫夫 / 著
陈子鹏 / 译







荣获世界科普最高奖：联合国教科文组织卡林加奖

清华大学校长送给新生的入学礼物

被誉为“20世纪经典科普著作”，值得年轻人一读的入门级科普经典

“大爆炸”理论推动者、世界顶级物理学家、宇宙学家、科普界“一代宗师”享誉世界之作

融汇数学、物理学、生物学、天文学、遗传学等于一体的科学通识必读之作，
用一晚上的时间了解科学的基础逻辑，奠定科学素养

SPM 南方出版传媒
广东科技出版社 | 全国优秀出版社

目录

初版序言
1961年版序言
第一部分：玩弄数字
- 第一章 大数
- 第二章 自然数和人造数

第二部分：空间、时间和爱因斯坦
- 第三章 空间的独特性质
- 第四章 四维的世界
- 第五章 时空相对性

第三部分：微观世界
- 第六章 下降的阶梯
- 第七章 现代炼金术
- 第八章 混沌之律
- 第九章 生命之谜

第四部分：宏观宇宙
- 第十章 拓宽视野
- 第十一章 创世之日
- 附录图版

初版序言

我们的旅程将从原子到恒星和星云，从熵到基因。空间能否弯曲？飞船又为何会收缩？我们将对此一一探寻。没错，我们将在这本书中讨论这些话题，以及其他许多同样非常有趣的话题。

我写这本书的出发点，是想尽可能地收集现代科学中最有趣的事实和理论，呈现给读者一幅宇宙在微观和宏观角度的整体图景，正如它展现在当今科学家眼中的模样。在完成这个宏大的计划时，我未曾尝试将整个故事全部道出，因为我知道这样的话，本书最终将难逃变成一套卷数极多的百科全书的结局。不过我选择讨论的主题却简明扼要地涵盖了基础科学知识的整个领域，不留任何死角。

我根据重要性和趣味性选取主题，而非简单性，这势必导致本书的内容深度的参差不齐。书中的部分章节看上去很简单，就算是孩童也能明白，而另一些则需要集中注意力认真学习才能完全理解。但是我希望，那些尚未踏入科学之门的读者在阅读本书时不会遭遇严重的困难。

另外要注意，书中的最后一部分讨论了“宏观宇宙”，这要比“微观宇宙”篇幅少不少。主要是因为我已经在另外两本书《太阳的生与死》（The Birth and Death of the Sun）和《地球自传》（Biography of the Earth）[1]中详细讨论了有关宏观宇宙的许多问题，因而倘若在这里再进一步讨论，可能就显得重复而乏味了。

因此在这一部分中，我将局限于对行星、恒星和星云世界的物理事实、事件和定律的大体描述，仅在近些年演进出新科学知识的几个问题上进行详细讨论。依照这个原则，我着重注意了以下两个最近的观点：剧烈恒星爆发，即“超新星”，是由所谓的“中微子”引起的，它是物理学已知的最小粒子；新的行星系形成理论，它摒弃了当今普遍接受的观点——行星形成与太阳和另一颗恒星的碰撞有关，而是重建了早年的、近乎要被遗忘的康德（Immanuel Kant）和拉普拉斯（Pierre-Simon Laplace）的观点。

我想对许多使用拓扑学变换（参见第三章）进行作画的画家和插画

师表示感谢，他们的绘图是本书中许多插图的基础。此外我还想感谢我年轻的朋友玛丽娜·冯·诺依曼（Marina von Neumann），她曾说，她在所有问题上都比她著名的父亲（冯·诺依曼，现代计算机之父）认识得更深。当然，除了数学，她说在数学方面她只能和她父亲打个平手。她在阅读了本书部分章节的手稿之后，说有很多地方看不懂，于是我才最终决定修改这本书，这是给孩子看的。

乔治·伽莫夫

1946年12月1日

[1] 纽约维京出版社，分别于1940年和1941年出版。

1961年版序言

所有的科学书籍都会在出版几年后过时，尤其是那些涉及极速发展的科学分支的作品。从这一点来看，我的这本首印于13年前的《从一到无穷大》还算走运。它成书于一系列重要科学进步刚刚出现之时，并且将许多进步写进了书中。为使其跟上时代，只需做相对少量的修改和增补即可。

其中一个重要进步是通过氢弹爆炸的形式成功释放热核聚变产生的原子能，以及进展缓慢但稳定的可控热核聚变的研究。因为有关热核聚变的原理及其在天体物理学中的应用已经在初版的第十一章中讨论过，因此人类对同一目标的前进脚步，只需在第七章的末尾增添一些新的内容即可。

其他的修改包括对宇宙年龄的估计从20亿年或30亿年提高到50亿年以上，并根据加利福尼亚帕洛马山上的200英寸（编注：1英寸＝2.54厘米）海尔望远镜的观测，修正了天文距离尺度。

生物化学的最新进展要求我重绘图101并修改对应的配文，同时在第九章的末尾增加一些关于合成简单的有机生命体的内容。在初版中我写道：“是的，在活的物质和非活的物质间必定存在过渡的一步，可能不知何时——也许就是不远的未来，一些天才的生物化学家能用普通的化学元素合成病毒分子，那么他就有权向世界宣布：‘我刚给一块死气沉沉的物质注入了生命的气息！’”好吧，几年前这一情况真的发生了，或者说几乎发生了，就在加利福尼亚，读者可以在第九章结尾看到对这一工作的简单说明。

另外一个修改是本书的第一版印刷中曾提到：“致我的儿子伊戈尔（Igor），他想成为一名牛仔。”许多读者来信询问他是不是真的成了牛仔。答案是否定的，他在这个夏天毕业，专业是生物，计划从事遗传学的工作。

乔治·伽莫夫

科罗拉多大学

1960年11月



第一部分：玩弄数字

第一章 大数

1.你能数到多大

曾有一个故事，两位匈牙利贵族决定玩一个游戏，谁说出最大的数谁就赢了。

“好呀，”其中一位说，“你先说你的数。”

经过几分钟绞尽脑汁的思考之后，第二位贵族终于说出了他能想到的最大的数。“三。”他说。

现在是第一位贵族的思考时间，但一刻钟之后他最终放弃了。“你赢了。”他同意道。

显然这两位匈牙利贵族不代表很高层次的智力[1]，况且这个故事可能更多的是对贵族的恶意诋毁，但这样的对话却可能真实发生在霍屯督人[2]之间。根据非洲探险家的记载，我们可以确认在一些霍屯督部族的词汇表中没有大于三的数字的词汇。当问询一位当地人他有多少个子女或者他杀过多少敌人的时候，如果答案大于三他会回答“许多个”。因此即使是霍屯督部族最凶残的战士，在数数方面也比不过美国幼儿园里的孩子，他们可以数到十呢！

现在我们习惯于认为我们想写多大的数字就可以写多大的数字——无论是用美分为单位表示战争的经费，还是用英寸[3]为单位表示星际间的距离——只要在数字的后面加上一连串的零即可。你可以一直写零到你的手腕发酸为止，在你手酸之前，你甚至能写出比可观测宇宙中的原子总数更大的数字：300 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000。

或者你可以写成：3×10^{74}。

这里10右上角的小字数字74表示的是3之后有74个零，换句话说，3要乘以74个10。

但古人并不知道这种“算数简示”的方法。事实上它在不到2000年前才被一位不知名的印度数学家发明。在他的伟大发明——这确实是一项伟大的发明，尽管我们通常没有意识到这点——之前，每个数位上的数字是用专门的符号，也就是我们现称的十进制单位，反复书写而成的。例如数字8732，古埃及人写作：



而在恺撒的办公室里，他的办事员会将其写成如下形式：

MMMMMMMMDCCXXXII

后一种表现形式你应该还很熟悉，因为罗马数字到现在还在使用——表示书籍的卷数或章数，或者在大纪念碑上记载下历史事件发生的日期。过去的计数要求通常不超过几千，更高数目的十进制单位也不存在，那么让一位无论在算数上多么训练有素的古罗马人写下“一百万”这个数字，他都会不知所措。他能实现要求的最好方法，可能就是写下1000个M，这可能要花几个小时（图1）。

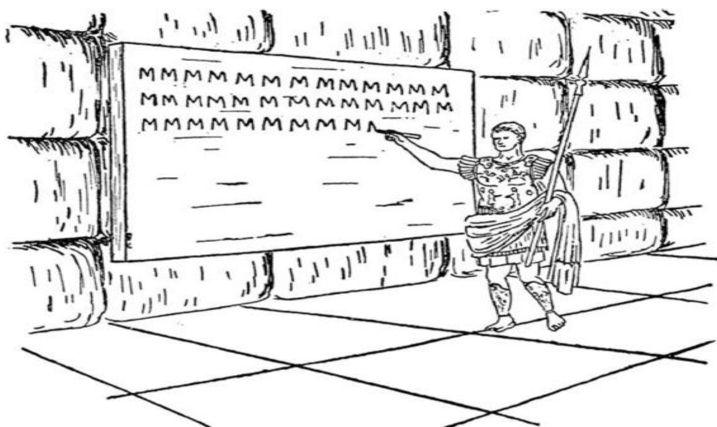


图 1

奥古斯都·恺撒时期的一位古罗马人尝试用罗马数字写出“一百万”。

但即使是写满墙上的板子可能都写不下“一百个一千”，也就是十万。

对于古人而言，诸如天上的星星、大海里的鱼和沙滩上的沙粒这些事物的数目都是“不计其数”的，就像在霍屯督语言中“五”是不计其数的，取而代之的是“许多”一样！

公元前3世纪大名鼎鼎的科学家阿基米德（Archimedes）曾开动他的脑筋，表明书写十分巨大的数字是可能的。

在他的论文《数沙者》中，阿基米德说：

“有人认为沙粒的数量是无限大的，我说的不只是叙拉古[4]（Syracuse）或西西里的其他地方，而是整个地球上能够找到的所有沙粒，无论是有人居住或者荒无人烟的地方。也有人认为沙粒的数目是有限的，只是没有更大的数字能超越地球上所有沙粒的总数。

“显然持有这种观点的人，如果他们能想象出一团与地球的质量一样大的沙子，这些沙子填充了所有的大海和空洞，一直堆到与最高的山峰相平，那么他们也会认为这些沙粒的数目是最大的。但我将尝试表达出比整个地球质量的沙粒数目还要大的数字，甚至是整个宇宙大小的沙粒的数目。”

阿基米德在这篇著作中提出的表示大数的方法与现代科学中表示的方法类似。他从古希腊算数中存在的最大数“万”（myriad），或者说十千开始。然后他引入了一个新数，“万万”（octade），他称之为“一亿”，作为“第二阶单位”；“亿亿”（octade octade）为“第三阶单位”；“亿亿亿”（octade octade octade）为“第四阶单位”，等等。

花费书上好几页去说明如何书写大数似乎是一件微不足道的事情，但在阿基米德时代，找到书写大数字的方法是一个伟大的发现，是对于数学学科的重大推进。

为计量填满整个宇宙的沙粒的数目，阿基米德需要了解宇宙有多大。在他的时代，宇宙被认为是一个镶嵌有星星的水晶球，与他同时代的著名天文学家，萨摩斯的阿瑞斯塔克斯（Aristarchus）估计，地球到天球边缘的距离是10 000 000 000个体育场[5]长度，或大约1 000 000

000英里。

相比天球的体积与沙粒数量，阿基米德完成了一系列足以吓到高中生的噩梦一般的计算，最终得出结论：

“显然，根据阿瑞斯塔克斯估计的天球的大小，宇宙能装下的沙粒的数目不会超过一千万个第八阶单位。”[6]

值得注意的是，阿基米德估计的宇宙的半径是明显小于现代科学家观测的结果的。十亿英里的长度仅仅略微超出太阳到土星的距离。随后我们可以看到，目前通过望远镜已经探索到的宇宙大小有5 000 000 000 000 000 000 000英里，因而能够填满整个可观测宇宙的沙粒数量应当超过：

10^{100}（或者说1后面跟100个0）。

很明显这要远大于宇宙中所有原子的数目——3×10^{74}（在本章开始时有所说明）。但我们不要忘记，宇宙并不是充满了原子，事实上平均每立方米的空间中才有一个原子。

不过我们并不需要通过做诸如将整个宇宙充满沙粒这样极端的事情来得到很大的数。事实上这些大数可能会突然出现在一些很简单的问题中，那些你根本想不到会遇上超过几千的数字的问题。

印度的舍罕王就曾在大数的问题上吃过亏。根据古老传说的记载，他想要赏赐宰相西萨·班·达伊尔（Sissa Ben Dahir）（图2），因其发明并进贡了国际象棋游戏。这位宰相的要求看似很简单：“陛下，”他跪在国王面前，“请在棋盘的第一格摆一粒麦子，第二格摆两粒麦子，第三格摆四粒麦子，第四格摆八粒麦子。陛下，如此往下，每往后一格的麦子数目都比前一格多一倍，直到摆满六十四格为止。”



图 2

宰相西萨·班·达伊尔——一位富有经验的数学家，向印度的舍罕王寻求赏赐。

“爱卿，你要求得不多。”国王说，他暗喜自己对这个神奇游戏的发明者赏赐礼物的开明提议并没有用掉他很多的宝藏库存，“你一定会如愿以偿的。”他命人拿来一袋小麦。

于是，当数麦粒的工作开始，第一格放一粒，第二格放两粒，第三格放四粒，但在达到第十二格所占的数目之前，袋子就空了。

更多袋的小麦被带到国王面前，但越往后的格子所需的麦粒的数目增长越是迅速，很快，他们发现整个印度的小麦产量都不能够满足他对西萨·班·达伊尔的许诺。要放满所有的格子需要18 446 744 073 709 551 615粒小麦！[7]

在算数中，一列后一个数是前一个数的固定倍数（在本例中这个倍数是2）的数列被称为几何级数。可以证明，这样的级数的各项之和，等于固定倍数（在本例中为2）的项数次幂（在本例中为64）减去第一项（在本例中为1），除以固定倍数与1的差。可以这样表示：

$$\frac{2^{63}\times 2-1}{2-1}=264-1$$

用具体的数字表示是：

18 446 744 073 709 551 615。

这个数不比宇宙中所有的原子的数目大，但也是足够可观了。假设一蒲式耳[8]的小麦包括大约5 000 000粒麦粒，那么想要满足西萨·班·达伊尔的要求需要40 000亿蒲式耳的小麦。而世界上小麦每年的平均产量大约在20亿蒲式耳，大宰相要求的小麦数目需要世界维持2000年这样的小麦产量！

舍罕王发现他欠了宰相很大一笔债，他要么面对这笔无穷无尽的债务，要么砍下宰相的头。我们怀疑他选择了后者。

另一个大数扮演主角的故事也来自印度，是有关“世界末日”的。波尔（W.W.R.Ball）是一位爱好数学的历史学家，用下述文字讲述了这个故事：[9]

在贝拿勒斯（Benares）[10]标记有世界之中心穹顶之下的圣殿当中放置了一块黄铜板，上面固定着三根金刚石针，每根长一腕尺（一腕尺约合20英寸，约45厘米），大约有蜜蜂的身体那么粗。在创世纪时，梵天[11]于其中一根针上自下而上放置了从大到小64片纯金片，最大的位于最下面，这就是梵天塔。值班的僧侣夜以继日地将金片从一根针移到另一根针上，根据梵天的永恒之律，僧侣一次只能移动一片，并且要保证不能有小的金片在大的之下（图3）。当64片金片全部从梵天创世时放置的那根针转移到另一根针之后，这座塔、庙宇、梵天和众生都将回归尘土，伴随着一声霹雳，世界也将消失。

图3是故事所描述的内容的图画，当然图画中的金片的数量要少一些。你也可以用纸板片替代金片、长的铁钉替代金刚石针，自己制作这样的智力游戏。

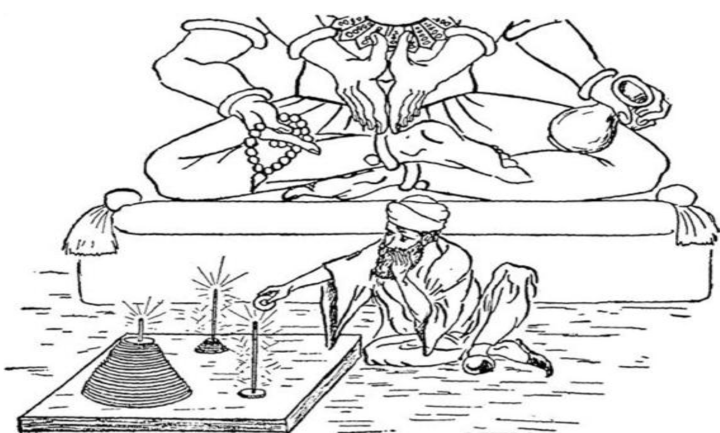


图 3

一位僧侣正在巨大的梵天雕像前，在“世界末日”的问题旁忙碌。图中画出的金片数量比64要少，因为难以画出那么多片。

根据移动金片的要求不难发现，每移动一片金片到另一根针上所需的移动次数，是移动上一片所需的移动次数的2倍。移动第一片仅需一步，但移动之后的金片的步数就将以几何级数增加，因而第64片移走之后总的次数将和西萨·班·达伊尔要求的麦粒数量一样！[12]

那么，移动梵天塔上的全部64片金片的时间是多久呢？假设僧侣们日夜工作毫无休假日，且每秒移动一次，而一年大约有31 558 000秒，那么换算下来大约需要580 000亿年的时间才能完成全部的工作。

将这个纯属传说的预言和现代科学的预测对比一下还是很有意思的。根据现代的关于宇宙演化的理论，恒星、行星，都诞生于大约30亿年前的无形物质之中。我们还知道，给恒星，尤其是给太阳提供能量的“原子燃料”还能维持100亿~150亿年。因而我们的宇宙的年龄总共也没有超过200亿年（参见“创世之日”一章）[13]，根本没有这个印度传说里的580 000亿年那么长。当然，这也不过是个传说罢了。

文学作品中提到的最大数恐怕要属大名鼎鼎的“印刷行数问题”了。假设我们制造了一台能持续一行行印刷的印刷机（图4），每行都能够通过替换字母或印刷符号来得到不同的组合。这样的机器包含有一系列外缘上刻有字母和符号的圆盘。这些圆盘将以类似于汽车上的里程计数器那样的方式装配，每当一个圆盘滚动一圈就会带动下一个圆盘向前滚

动一个符号，来自纸卷的纸张会自动送到圆盘滚筒下印刷。这样的自动印刷机应该不难制造，它的一种造型如图4所示。

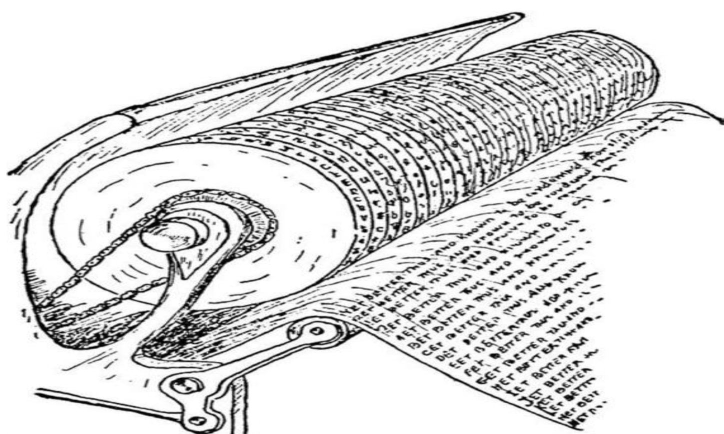


图 4

一台自动印刷机刚刚印出一行莎士比亚的名句。

让我们开动机器，然后查看印刷出来的无尽的行列，其中的大部分毫无意义。它们可能长这样：

“aaaaaaaaaaa…”

或

“booboobooboo…”

抑或：

“zawkporpkossscilm…”

但既然这台机器能打印出所有可能的字母和符号的组合，我们可以发现，在这些各种各样的无意义的句子垃圾中也能够找到有用的句子。

当然，有些句子有意思但是没有意义，比如：

“horse has six legs and…”（马有六条腿和……）

或

“I like apples cooked in terpentin…”（我喜欢用松节油煎的苹果……）

但随着更仔细的搜索，我们能找到莎士比亚写的每一句话，甚至他扔进废纸篓里纸上的句子！

事实上这种自动印刷机能印出所有人自会写字后写出的每一句话——每一篇散文、每一首诗、每一篇报纸上出现的社论和广告、每一卷厚重的学术论文、每一封情书、每一条订奶单……

除此之外，这台机器还能印出未来世纪里将要印出的词句。在滚筒下转出的纸张上，我们将发现30世纪的诗篇、在未来成为现实的科学发现、将在第500届美国国会上读出的演讲稿、公元2344年的行星际交通事故的统计记录。印刷出的纸上将有一篇篇尚未被创作的短篇故事和长篇小说，而出版商只需在他们的地下室里放上这样一台机器，然后在印刷出的大量垃圾中寻找好词句出版即可——他们现在也差不多是这么做的呀。

那为什么这无法完成呢？

好吧，我们来数一数，为得到所有的字母和印刷符号组合需要多少行。

英语字母表中有26个字母，10个数字，14种常用符号（空格、句号、逗号、冒号、分号、问号、感叹号、破折号、连字符、引号、省略号、小括号、中括号、大括号），共计50个字符。我们还假设这台机器有65个圆轮，表示每行有65个字符位。每行的开始都有50种字符的可能，每种可能的下一位都再有50种可能；这总共就是50×50＝2 500种可能。然而前两位字符的每一种组合我们都再对应50种第三位字符的选择，之后的第四位同理。最后整个句子的排列可以表示为：

$$\underbrace{50\times 50\times 50\times\cdots\times 50}_{65\text{次}}$$

或 50^{65}

约等于 10^{110}

为感受这个数字的巨大，我们把宇宙中的每个原子都想象为一台印刷机，那么我们就有3×10^{74}台同时工作的机器。进一步假设所有的机器都从宇宙创始时开始工作，它们工作了30亿年之久，或者说10^{17}秒，以原子振动的频率印刷，也就是每秒10^{15}行。那么到现在它们应该打印出了大约$3\times10^{74}\times10^{17}\times10^{15}=3\times10^{106}$行——大约只有所需总量的万分之三。

显然，想在这些自动印刷的材料中做任何的选取都要花费相当长的时间！

2.如何计数无穷大

在前一节里我们讨论了数字，其中的许多都是相当大的数。但即使是这些数字巨大，例如西萨·班·达伊尔要求获得的麦粒数是令人难以置信的大，它们也是有限的，在时间足够长的情况下总能写到它的最后一位。

也有些数字真的是无限的，比我们能写出的任何数都要大。因此“所有数字的数目”显然是无穷大的，“一条线段上的所有几何点的数目”也一样。那么，有没有什么办法可以描述它们而不只是说它们是无穷大的，或者说，有没有可能举个例子，比一比两个不同的无穷大，看哪一个“更大”？

“所有数字的数目相比一条线上所有点的数目是大还是小？”这样的问题有意义吗？这个乍看有些荒诞的问题，著名数学家乔治·康托尔（Georg　Cantor）最先思考过，他确实可以被称为“无穷大数算数”的奠基人。

当我们想要讨论无穷大数是更大还是更小时，我们面临的问题是，需要比较我们既不能命名又不能写下的数字，这时我们就像一位正在查看自己的宝箱中是玻璃珠多还是铜币多的霍屯督人，但是你应该还记得，霍屯督人数不了比3大的数。那他会因为数不了大于3的数而放弃比较玻璃珠和铜币的数目吗？显然不可能。如果他足够聪明，他会通过一个一个比较玻璃珠和铜币来得到答案。

他会把一粒玻璃珠放在一块铜币旁边，另一粒玻璃珠放在另一块铜币旁边，然后继续下去……如果玻璃珠用完了而铜币还有，他便知道铜币更多，反之玻璃珠更多，如果都用完了就是一样多。

康托尔提出了完全一致的方法来比较两个无穷大的数：假使我们能将两个无穷大里的成分一一配对的话，如果没有剩余成分，就说明两个无穷大是一样的。但如果这样的安排是无法进行的，其中一个无穷大中有成分剩余，我们就说这个无穷大比另一个更大，或者说更强。

这显然是最合理的，也是唯一可行的比较无穷大的数量的方法。但当我们准备实际套用它的时候我们会再大吃一惊。举个例子，奇数和偶数都是无穷多，你会自然而然地觉得这两个无穷大是一样大的，即奇数和偶数一样多，这和上述的法则也完全一致，因为一对一配对这些数字可以得到：

[illegible]

[illegible]

在这里每一个偶数都与一个奇数配对，反之亦然，因此偶数的无限多与奇数的无限多一样大。这是显而易见的！

下面哪个数目你认为更大：所有整数的数目，包括所有偶数和奇数，还是只有偶数的数目？你当然会说所有整数的数目更大，因为它既

包含了偶数，还包含了奇数。但这只是你的印象，为了得到准确的答案你还是要套用上面比较两个无穷大的法则。

然而，如果你用了这个法则你就会惊诧地发现你的印象是错的。事实上，当一一配对所有整数和偶数时：

[illegible]

[illegible]

根据我们的比较无穷大的法则，我们必须承认，偶数数目的无穷大和整数数目的无穷大是一样大的。这听起来与常理相悖，因为偶数只是整数的一部分，但我们必须记住，当我们和无穷大数打交道的时候，我们必须准备好面对意想不到的性质。

实际上在无穷大的世界里，部分可能和整体相等！这一点或许最适合用关于德国著名数学家大卫·希尔伯特（David Hilbert）的一个故事来阐述。据说他在关于无穷大的课堂上将无穷大的这种似是而非的性质用下面的话表述出来：[14]

我们来想象一家拥有有限多房间的宾馆，并假设所有房间都已经有人入住。一位新的房客到来，询问是否有空房。“很抱歉，”房东说，“房间已满。”现在我们再想象一家拥有无限多房间的宾馆，全部住满。同样有位新房客来询问房间。

“当然没问题！”房东说，他将原来住在N1房间的房客移到N2房间，N2房间的房客移到N3房间，N3移到N4，如此类推……最终新房客住进了N1房间，一切都好。

我们再来想象一家拥有无限多房间的宾馆，房间全部住满，然后来了无限多数量的新房客询问房间。

“当然，先生们，”房东说“稍等一下即好。”他将N1房间的房客移到N2，N2房间的移到N4，N3的移到N6，如此类推……

“这样一来所有奇数号的房间都空出来了，无限多数目的房客就可以入住了。”

当然，因为身处世界大战之中，即使是在华盛顿也很难想象希尔伯特所描述的情况，但这个例子举得恰到好处，它告诉我们无穷大数的性质与普通数字的算数法则大不相同。

根据康托尔的比较两个无穷大数的法则，我们还能证明所有的普通算数分数，如$\frac{3}{7}$或$\frac{735}{8}$的数目与所有的整数的数目相同。事实上我们可以使用下面的规则来排列分数：我们先写下分子和分母之和为2的分数，即$\frac{1}{1}$；然后是和为3的分数：$\frac{2}{1}$和$\frac{1}{2}$；然后是和为4的分数：$\frac{3}{1}$，$\frac{2}{2}$，$\frac{1}{3}$，如此往下。按照这样的方式操作我们就能得到一列包含所有能想到的分数的数列（图5）。现在在这个数列之上写下整数的数列，你会发现这两个数列是一一对应的。这说明分数和整数的数量是一样多的！

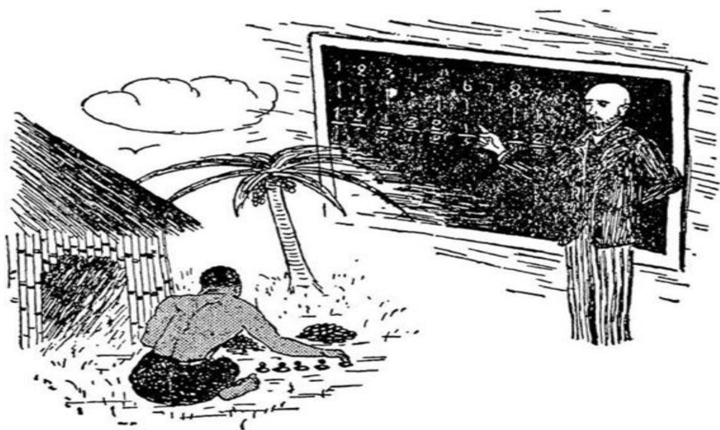


图 5

一名非洲土著和乔治·康托尔教授正在比较超过他们计数能力的数字。

“嗯，这很棒，”你会说，“但这不就表明所有的无穷大数都相等了吗？如此一来，这还有什么可比性吗？”

不，事情并不是这样的，人们很容易找出比所有整数或者分数的数目更大的无穷大数。

事实上，如果考虑一下本章前面提到的一条线段上的点的数目与所

有整数的数目的比较，我们会发现这两个无穷大是不一样大的，一条线段上的点的数目要比整数或分数的数目多得多。为证明这一点，我们尝试建立一条1英寸长的线段上的所有点和整数数列的一一对应的关系。

这条线段上的每一点都可以描述成这一点到线段的末尾的距离，而这个距离可以写成无限小数的形式，如0.735 062 478 005 6…或0.382 503 756 32…[15]。因而我们需要比较所有整数的数目和这些所有可能的无限小数的数目。那么上面给出的无限小数和普通算数分数，例如 $\frac{3}{7}$ 或 $\frac{8}{227}$ ，有什么区别呢？

在学过的算术课上你需要记得，一些分数都可以被转化为无限循环小数，比如，$\frac{2}{3}=0.66666\ldots=0.\dot{6}$，$\frac{3}{7}=0.428571|428571|428571|4\ldots=0.\dot{4}2857\dot{1}$。我们已经通过上文证明了所有普通算数分数的数目与所有整数的数目相同，所以所有无限循环小数的数目与所有整数的数目相同。但是线段上的点并不只是对应无限循环小数，在大部分情况下我们得到的无限小数里的数字没有任何规律可言。显然这轻易就证明了“一一对应的关系”是无法得到的。

假设有人声称建立了这样的对应关系，并且它长得像这样：

N

1 0.386 025 630 78…

2 0.573 507 620 50…

3 0.993 567 532 07…

4 0.257 632 004 56…

5 0.000 053 205 62…

6 0.990 356 385 67…

7 0.555 227 305 67…

8 0.052 773 656 42…

… ……

当然，既然不可能把无穷多的整数和无限位数的小数全部写出来，上述的声明意味着此人发现了某种普遍规律（就像我们用来排列普通分数的一样），根据这个规律他写出了上面这张表，而这个规律可以保证每个小数都迟早会出现在表上。

不过，我们不难证明这种声明是靠不住的，因为我们总是能写出这张无限的表里不包含的无限小数。如何做到呢？这很简单，只要写下第一位小数不同于表里N1的小数的第一位的，第二位小数不同于N2的第二位的，如此类推。最后你得到的数字会长这样：

非[illegible]

↓

[illegible]…

这个数不在这张表里，无论你往下看多少项。其实如果表的作者告诉你，你写的这个小数在表里的第137号（N137，或其他任何一号），你可以立即反驳：“不，这两个小数不同，因为它们的第137位小数是不一样的。”

因此线段上的点和整数数目之间一对一的对应关系是不可能建立的，这就说明线段上点的个数比所有整数或分数的数目更大，或者说更强。

我们之前讨论的是“1英寸长的”线段上的点，但根据我们的“无穷大算数”，显而易见,任何长度的线段都服从这一规律。事实上，1英寸、1英尺、1英里长的线段上的点的数目都是一样多的。为证明这点我们可以看一下图6，它比较了两条不同长度的线段AB、AC上的点的数目。

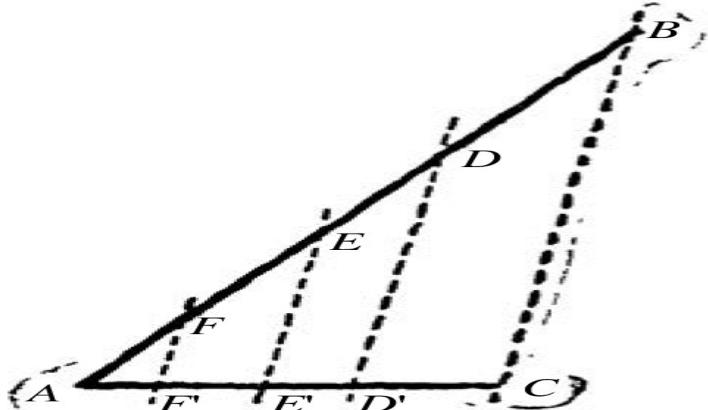


图 6

为建立两条线段上的两点之间的一一对应关系，我们可以画无数条BC的平行线，这些线各交AB和AC于一对点，比如D和D'，E和E'，F和F'，等等。这样一来，AB上的每个点就都对应有AC上的一个点，反之亦然。因此根据无穷大的规则，这两条线段上（即AB、AC）无穷多的点的数目是一样多的。

其实随着对无穷大的研究，一个更令人惊诧的结论可以表示为：一块平面上的点的数目与一条线段上的点的数目是一样多的。为证明这点，我们可以以一条长1英寸的线段AB与正方形CDEF为例（图7）。

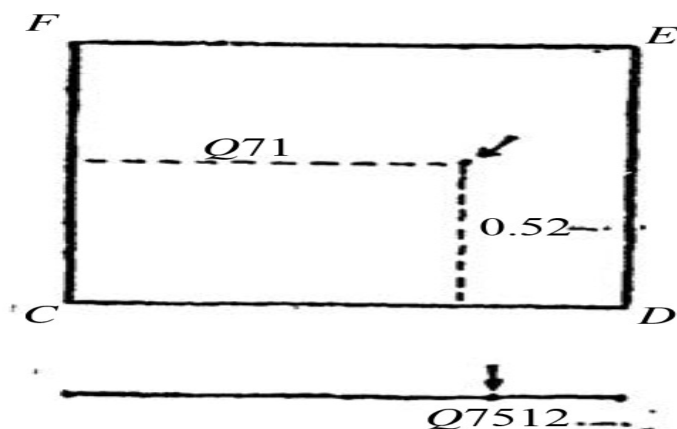


图 7

假设线段上给定的某点，数值是0.751 203 86…，我们可以把这个数分成两个小数，选取其偶数位和奇数位的小数，然后分别拼在一起，我们可以得到：

0.710 8…

和

0.523 6…

在正方形里测量这两个数字分别对应的水平和垂直距离，然后把得到的点称为线段上的原始点的“对应点”。反之，如果我们在正方形里有一个点，位置可以表述为：

0.483 5…

和

0.990 7…

我们可以通过融合这两个数字，获知其在线段上的“对应点”是：

0.498 930 57…

显然这个过程建立了一一对应的关系。线段上的每一点都有它在正方形里的对应点，正方形里的每一点也有它在线段上的对应点，没有剩余的点。根据康托尔的准则，正方形里的点的个数的无穷大数与线段上的点的个数的无穷大数是相等的。

通过类似的方式我们也能轻易证明，表示一个立方体里的点的个数的无穷大数与表示正方形里的点的个数的无穷大数，或者表示线段上的点的个数的无穷大数是一样多的。为证明这点，我们只需要把原来的小数分成三个部分[16]，然后用这三个新的小数来描述正方体里的“对应点”的位置。

另外，和两条不同长度的线段上的点的数量相同的情况一样，不同尺寸的正方形和立方体里的点的数目也是一样的，无论它们有多大。

然而，所有几何点的数目，尽管它们比整数和分数的数目大，但并不是数学家已知的最大的无穷大数。事实上数学家发现，所有曲线的样式的数量总和，包括那些最奇异的形状，是比几何点的总数更大的“社

群”，因此它们必须要用第三级的无穷数列来表示。

乔治·康托尔——“无穷大算数”的创造者，将无穷大数用希伯来字母N [读作阿莱夫（Alef）]表示，在其右下角标注一个数字表示无穷大的等级。如此一来，数列（包括无穷大数）的表示形式便是这样的：

1，2，3，4，5，…，N1，N2，N3，…

我们说“一条线上有N1个点”，或者说“有N2种不同的曲线”，正像我们说“世界有7大洲”或“一盒扑克牌有52张”[17]一样。

在总结关于无穷大的讨论之时，我们需要指出只要几个等级就能涵盖我们能想到的一切无穷大的情况。我们知道N0表示所有整数和分数的数目，N_1表示所有几何点的数目，N_2表示所有曲线样式的数目，但迄今为止还没有人想到任何能用N_3表示的确切的无穷大物体的集合（图8）。

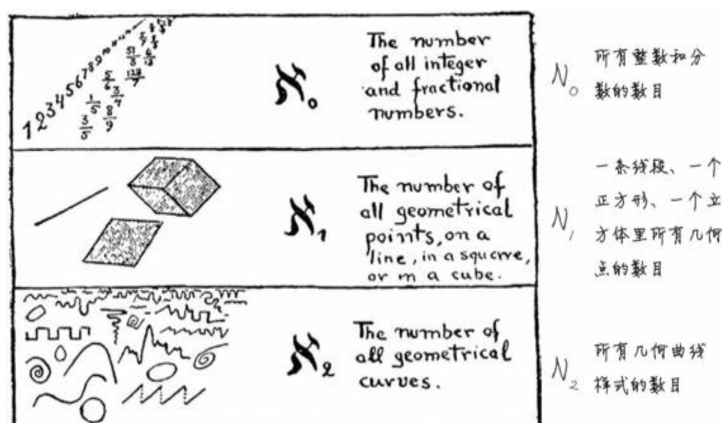


图 8

已有的三个无穷大看似已经足以计数所有我们能想到的无限多的物体，并且我们发现，我们已经完全不像我们的老朋友霍屯督人那样了——他们甚至连第四个儿子都数不出来！

[1]　这个论据有另一个属于同一系列的故事的支持：一群匈牙利贵族在攀爬阿尔卑斯山的过程中迷路了。其中一个拿出一张地图，在研究了很久之后表示，“我知道我们在哪儿了！”“哪儿？”其他人问。“看见那

座大山了吗？我们就在山顶上！”

[2]　霍屯督人（Hottentots），南部非洲的种族集团。自称科伊科伊人。主要分布在纳米比亚、博茨瓦纳和南非（译注）。

[3]　本书多处使用“英寸”“英尺”“英里”“磅”等英制单位，为保留原数据的整数情况，同时也考虑到读者的阅读体验，所以没有进行单位换算。1英寸＝2.54厘米，1英尺＝3.048分米，1英里＝1.609千米，1磅＝0.45千克（编注）。

[4]　叙拉古，西西里岛东海岸城市（译注）。

[5]　一个希腊的“体育场”的长度是606英尺6英寸或188米。

[6]　用我们的计数法表示：

一千万 第二阶 第三阶 第四阶

10 000 000×100 000 000×100 000 000×100 000 000×

第五阶 第六阶 第七阶 第八阶

100 000 000×100 000 000×100 000 000×100 000 000

或简写为：10^{63}（1后面63个0）。

[7]　聪明的宰相要求的麦粒的数目可以表示为如下的形式：$1+2+2^2+2^3+2^4+\ldots+2^{62}+2^{63}$。

[8]　蒲式耳，欧美使用的计量谷物和水果的体积单位，约合8英制加仑，即36.37升。

[9]　波尔，《数学游戏和论文》（Mathematical Recreations and Essays，麦克米兰公司，纽约，1939）。

[10]　贝拿勒斯，印度北部城市，印度教的圣地。

[11]　梵天，印度教的创造之神（译注）。

[12]　如果我们只需要移动7片金片，最少需要：$1+2^1+2^2+2^3+\cdots$，

或$2^7-1=2\times2\times2\times2\times2\times2\times2-1=127$次。

如果你迅速且没有失误地完成移动，需要大约1小时来完成这个任务。

当总共有64片时，移动全部所需的最少次数是：

$2^{64}-1=18\ 446\ 744\ 073\ 709\ 551\ 615$

这和西萨·班·达伊尔要求的麦粒数量一样。

[13]　目前天文学家的结论是宇宙的年龄大约有138.2亿年，而太阳的年龄大约有45.7亿年，预计太阳还能继续燃烧50亿～60亿年。作者创作本书时的天文学发展还未到今天的层次，因而对宇宙的认识不如当今（译注）。

[14]　本段引自：《希尔伯特轶事全集》（The Complete Collection of Hilbert Stories），库兰特（R. Courant）著。他的这段话从未被印刷出来，甚至从未写下来过，但在其他的书籍里广为流传。

[15]　这些小数都小于一，因为我们已经假定线段的长度是1（英寸）。

[16]　比如：

0.735 106 822 548 312…

我们分成

0.718 53…

0.302 41…

0.562 82…

[17]　52张没有包含大小王（译注）。

第二章 自然数和人造数

1.最纯粹的数学

数学通常被人们，尤其被数学家，认为是一切科学之皇后，而贵为皇后，它自然不能屈尊于其他的知识分支。因此，在一次“纯粹数学和应用数学联合会议”上，大卫·希尔伯特被要求发表一次公开演讲，来缓和两组数学家之间的敌对情绪，他这样开场：

“我们经常听到有人说，纯粹数学和应用数学是相互对立的。这是不对的。这两者过去不曾对立，将来也不会对立。纯粹数学和应用数学不应对立，因为，事实上，两者没有任何相通之处。”

但尽管数学热衷于保持纯粹性，远离其他的科学，其他的科学却喜欢数学，尤其是物理，一直在尝试尽可能地“亲善”数学。事实上，几乎纯粹数学的每一个分支现在都能够被用来帮助解释物理宇宙里的这个或那个现象。其中包括诸如抽象群、不可逆代数、非欧几何这样的总是被认为是最纯粹的、最不适宜拿到应用层面的准则。

但是，当今数学还有一个大的系统尚未被发现有任何实际的用途，除了用来模拟一场智力体操，它真的可以荣膺“纯粹之皇冠”，这就是所谓的“数论”（这里是指整数）。它是纯粹数学里最古老的也是最错综复杂的思想产物。

奇怪的是，数论作为数学领域中最纯粹的分支，从某方面来说却是一门经验科学，甚至可以说是实验科学。事实上它的大部分定理都是依靠“用数字去做些什么”来建立的，正如很多物理学定律是依靠“物体去做些什么”而得到的一样。并且同物理学的一些定律一样，数论中的某些命题已经“通过数学方法”证明，而其他的一些仍是纯粹来源于经验，至今仍让最杰出的数学家头疼。

举个有关质数的问题的例子。

质数是不能被除了1和它本身之外的任何数除尽的数，1、2、3、

5、7、11、13、17…，都是质数[1]，而例如12就不是，因为它可以被拆分成2×2×3。

质数的数量是无限的，还是存在一个最大的质数，在它以上的任何数都可以表示成质数的乘积呢？欧几里得（Euclid）最先考虑了这个问题，他给出了一个非常简单而优美的证据，证明质数的数目是无穷无尽的，没有所谓的“最大的质数”。

为研究这个问题，我们不妨假设质数是有限多的，并用N表示最大的质数。现在我们将所有质数相乘，然后加上1。我们可以这么写：

（1×2×3×5×7×11×13×…×N）+1

显然这个数比“最大的质数”N要大多了。但显而易见的是，这个数不能被除了1以外的任何一个质数（直到N）除尽，因为根据创造这个数的方式可以发现，用任何一个质数去除它都会剩下1。

因此这个数要么也是个质数，要么能整除它的质数就比N还要大，这两种情况都与“N是最大的质数”这一假设相违背。

这种证法叫作反证法（reductio ad absurdum），是数学家最爱用的工具之一。

我们一旦知道了质数的数目是无限大的，就会很容易问出口：有没有一种简便的方法能让我们一个不漏地列出所有的质数？

最早由古希腊哲学家、数学家埃拉托斯特尼（Eratosthenes）提出的一种实现这个问题的方法，名为“过筛”。在这个方法中，你需要做的是写下完整的整数列表，1，2，3，4，…，然后筛掉所有2的倍数，3的倍数，5的倍数，…。前100个整数经过埃拉托斯特尼的筛之后，情况如图9所示。

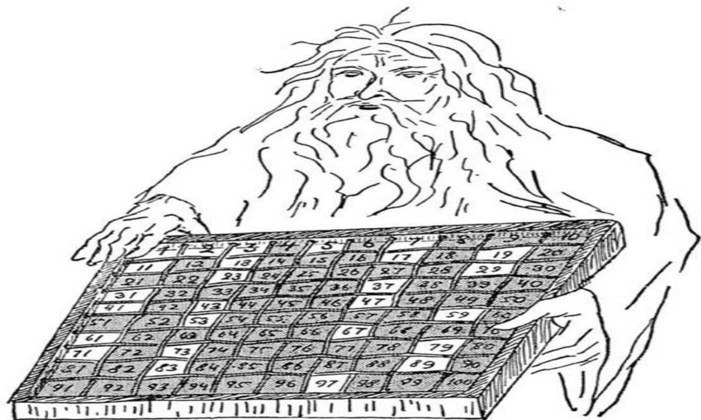


图 9

这里总共包含26个质数。使用上述的简单的过筛方法，我们已经建立了10亿以内的质数表。

但如果有更简单的方法，只要一个公式，就能迅速而自动地找到所有的质数，而且只有质数就好了。但数个世纪以来，关于这个公式的努力均宣告失败。

1640年，法国著名数学家费马（Fermat）认为他发明出了这样一个能只算出质数的公式。

在他的公式$2^{2^n}+1$里，n取自然数，1，2，3，4，…。

通过这个公式我们发现：

$2^2+1=5$

$2^{2^2}+1=17$

$2^{2^3}+1=257$

$2^{2^4}+1=65\ 537$

每个算式的结果事实上都是质数。但在费马公布公式约一个世纪之后，德国数学家欧拉（Euler）指出，费马的第5个式子$2^{2^5}+1$得到的结果4 294 967 297不是质数，它是6 700 417和641的乘积。费马的计

算质数的经验公式是错的。

另一个值得一提的计算质数的公式是：

n^2-n+41

n取1，2，3，等。当n取1～40时，代入得到的结果都是质数，但很不幸，当n取41时就错得离谱了。

$(41)^2-41+41=41^2=41\times41$

得到的是一个平方数，而不是质数。

另一个尝试产生质数的公式：

$n^2-79n+1601$

直到n取79时得到的都是质数，但在n取80时就不行了。

因此，寻找只给出质数的普遍公式的问题至今仍未解决。

另一个既未得到证明，也未得到证伪的数论定理的有趣例子，是1742年被提出的哥德巴赫（Goldbach）猜想，即任何偶数都可以表示为两个质数之和[2]。

从一些简单的例子来看，这是显而易见的，比如：12＝7＋5，24＝17＋7，32＝29＋3。但在做了大量的有关这个猜想的工作之后，数学家依旧不能得到确定的证明，同时也无法给出任意一个反例。

在1931年，苏联数学家施尼勒尔曼（Schnrrelman）朝向最终的证明成功迈出了建设性的第一步——他证明了每个偶数都可以表示为不超过300　000个质数的和。而施尼勒尔曼的“三十万个质数的和”和翘首以盼的“两个质数的和”之间的鸿沟，在不久之后被另一位苏联数学家维诺格拉多夫（Vinogradoff）大大缩短了，他将其缩减到“四个质数的和”。但从维诺格拉多夫的“四”到哥德巴赫的“二”的最后两步似乎是最艰难的，没人知道跨出这两步需要再花几年还是几个世纪的时间。

好吧，我们与一个能自动给出任意大小的质数的公式似乎还遥不可

及，甚至我们都没法保证能否推导出这样一个公式。

我们来讨论一个更小一点的问题——在给定范围内的质数的比例有多大？当数字范围越来越大的时候，这个百分比会不会更趋近于一个常数？如果不是，它会增加还是减少？我们可以用经验方法来回答这个问题：直接数数表里的质数。

通过计数我们发现，100以内有26个质数，1000以内有168个，1 000 000以内有78 498个，1 000 000 000以内有50 847 478个。将质数数目除以整数数目，我们得到下表：

1~N	质数数目	百分比 (%)	$\frac{1}{\ln N}$
1~100	26	[illegible]	[illegible]
1~1000	168	[illegible]	[illegible]
1~1 000 000	78 498	[illegible]	[illegible]
1~1 000 000 000	50 847 478	[illegible]	[illegible]

这张表首先显示了，当整数范围增大时，质数的相对数量逐渐减少，但没有减少到没有质数的情况。

有没有一种简单的方法可以用数学形式表达这种整数范围增大时质数的比例减少的情况呢？当然有，并且这个有关质数平均分布的规律已经成为整个数学学科领域最引人注目的发现之一。这条规律可以简单表示为：在1到N的范围中，质数所占的比例约等于N的自然对数的倒数[3]。N越大，比例越接近。

上表的第四列是N的自然对数的倒数。如果你将其和前一列的数值做对比的话，你会发现两者之间的差距很小，而且N越大差距越小。

与数论中的其他很多定理一样，上述的质数理论最先是通过经验发现的，在很长一段时间内都没有得到严格的数学证明。直到19世纪末，法国数学家阿达马（Hadamard）和比利时数学家德拉瓦莱普森（de la Vallee Poussin）才终于证明了它，因为证明方法过于复杂，在这里就不赘述了。

提到整数就不得不提到费马大定理，尽管它和质数没有什么必然的联系。这个问题可以追溯到古埃及，那里的每一个好木匠都知道边长之比为3:4:5的三角形必然包含一个直角。事实上古埃及人就将这种三角形——现称埃及三角形——作为木匠的三角尺。[4]

3世纪时，亚历山大里亚城[5]的丢番图（Diophantes）[6]开始思考是不是只有3和4这两个整数的平方和等于另一个整数的平方。他证明了有其他的整数符合这样的性质（实际上有无穷多个），并给出了找到它们的一般规律。这种三边长都是整数的直角三角形现在被称为毕达哥拉斯[7]三角形（pythagorean triangles），埃及三角形是其中的第一个。建立毕达哥拉斯三角形的问题可以简单表示为如下代数等式，其中x，y和z都必须是整数[8]：$x^2+y^2=z^2$

1621年皮埃尔·德·费马（Pierre de Fermat）在巴黎购买了丢番图所著的《算数》（Arithmetica）的法文译本，其中就探讨了毕达哥拉斯三角形。他在阅读时，在空白处批注了$x^2+y^2=z^2$有无限多的整数解，而形如$x^n+y^n=z^n$的等式，当n大于2时，则不再有整数解。

“我想到了证明这一点的绝妙方法，”费马补充道，“但书页的空白处写不下了。”

费马去世后，这本丢番图的书在他的图书馆被发现，空白处的批注随之举世而闻。

这已经是3个世纪之前[9]的事了，自此之后，各国顶级的数学家都在设法重建费马在空白处写下批注时想到的证明，但直到现在也尚未发现有成功者。

可以肯定的是，数学家在追寻终极目标的过程中已经有了相当大的进展，数论中的全新概念——“理想理论”[10]，也在证明费马理论的尝试中诞生了。欧拉证明了$x^3+y^3=z^3$和$x^4+y^4=z^4$这两个方程不存在整数解，狄利克雷（Dirichlet）[11]证明了x5+y5=z5也是如此，经过众多数学家的联合努力，我们现在已经得到n小于269时费马的方程没有整数解的结论。但对任意的n均成立的一般证明尚未得出[12]，而越来越多的人开始怀疑，费马其实并没能做出证明，或者是在他的证明中什么

地方出错了。

为获得解法，曾有人悬赏10万德国马克，这使得费马大定理轰动一时——尽管那些冲着金钱而来的业余爱好者并没有获得过什么进展。

费马大定理的确有可能是错误的，只要能找到某两个整数的某一次幂等于第三个整数的相同次幂的反例即可。但考虑到这样的例子要在幂次大于269的情况下找，难度可是不容小觑啊。

2.诡秘的$\sqrt{-1}$

现在我们来接触一点更深入的算术。

二二得四， 三三得九， 四四十六， 五五二十五，因此，四的算术平方根是二， 九的算术平方根是三， 十六的是四， 二十五的是五。[13]

但负数的算术平方根又会是什么呢？诸如$\sqrt{-5}$和$\sqrt{-1}$这样的表达形式有意义吗？

如果你尝试从理性的角度去考虑，一定会毫无疑问地得出结论：上述的表达形式毫无意义。引用12世纪数学家布哈斯克拉（Bhaskara）的话说：“正数和负数的平方都是正数。因此，正数的平方根有两个，一个是正数，一个是负数。负数没有平方根，没有负数是平方数。”

但数学家们是固执的，当一些没有意义的东西出现在他们的公式里时，他们会想尽一切办法赋予这些东西意义。显然负数的平方根总是会出现在各种情况中，无论是在困扰过去数学家的简单的算术问题中，还是在20世纪相对论理论框架下的关于时空统一的问题里。

第一位将看似没有意义的负数平方根写入公式的勇士是16世纪意大利数学家卡尔丹（Cardan）。在讨论“将10分成两部分，使得这两部分

的乘积为40”的可能时，他指出，尽管这个问题没有任何正有理数解，但可以用这样两个不可能的数学式表示：$5+\sqrt{-15}$和$5-\sqrt{-15}$。[14]

尽管卡尔丹对这两个算式持保留意见，因为它们是没有意义的、虚构的、想象的，但他还是写了下来。

既然有人敢于写下负数的平方根——虽然这可能是虚构的，但将10拆分成两个所需的部分的问题确实得到了解决。封住负数平方根的坚冰已然被敲开，这个被卡尔丹命名为虚数的平方根正越来越频繁地被数学家使用，尽管这种使用方式总是招致怀疑，或者需要正当理由。

在1770年出版的由著名德国数学家欧拉[15]所著的代数书中，我们找到了更多使用虚数的例子，但是他又留下了这样的评语：“一切形如$\sqrt{-1}$、$\sqrt{-2}$的表达式，都是不可能的，或者说是虚无的，因为它们表达的是负数的平方根，对于这样的数字我们只能断言，它们既不比任何数大，也不比任何数小，它们的组成是虚无的。”

尽管存在这些责难和非议，虚数在数学中还是成了像分数一样不可或缺的存在，如果没有它，数学的发展将寸步难行。

事实上，虚数更像是实数在镜子中的幻象，而且正如所有的实数都可以由基础数字1产生，所有的虚数也可以由虚数单位 产生，我们用符号i来表示这个单位。

如此一来，显而易见地，$\sqrt{-9}=\sqrt{9}\times\sqrt{-1}=3i$，$\sqrt{-7}=\sqrt{7}\times\sqrt{-1}=2.646\ldots i$，等，因此每个实数都有其相对应的虚数。你也可以把实数和虚数结合起来，用单一的表达方式，如卡尔丹最先写出的$5+\sqrt{-15}$，就等于$5+i\sqrt{15}$。这种混合体被称为复数。

自闯进数学领域以来，足足2个世纪，虚数仍旧披着神秘莫测、不可思议的面纱，然而，这层面纱最终被两位业余数学家——挪威测绘员韦塞尔（Wessel）和法国巴黎簿记员罗伯特·阿尔冈（Robert Argand）通过简明的几何表示方法揭开了。

根据他们的表示方法，一个复数，如$3+4i$，其表示方式如图10所示，其中3表示水平方向的坐标，4表示垂直方向的坐标。

所有的实数（正数或负数）都对应着水平轴上的点，所有的纯虚数都对应着垂直轴上的点。

当我们将一个表示水平轴上的点的实数，例如3，乘以虚数单位i，我们会得到纯虚数3i，对应的是垂直轴上的一个点。因此，将任何实数乘以i，其几何意义都相当于逆时针旋转了90°（图10）。

如果我们再给3i乘以i，那么我们必须再逆时针旋转90°，点的位置又回到了水平轴上，只不过是在负值的一端。因此有：

$3i\times i=3i^2=-3$，$i^2=-1$

当然，“i的平方等于-1”这个说法要比“连续两次旋转90°（都是逆时针）你会得到相反的方向”容易理解得多。

混合的复数也同样服从这个规则。将$3+4i$乘以i我们得到：

$(3+4i)i=3i+4i^2=3i-4=-4+3i$

你立刻就能从图10里看出，$-4+3i$的点是$3+4i$的点以原点为中心逆时针旋转90°的结果。同样，任何数乘以$-i$，也不过是将其所代表的点以原点为中心顺时针旋转90°，这一点也可以从图10中看出。

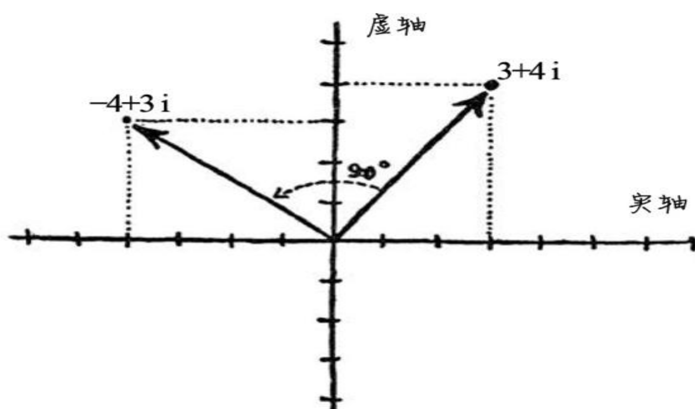


图 10

如果你觉得虚数周围仍然笼罩着诡秘的迷雾，那就用一个包含虚数的简单的实际应用来驱散它吧。

曾有一位爱冒险的年轻人在他的曾祖父的文稿中找到了一卷羊皮纸，里面的内容揭示了一处神秘宝藏的位置。上面的指示说：

“航行到北纬____，西经____[16]，你就能找到一

座荒岛。岛的北岸有一大片草地，其中种着一棵橡树和一棵松树[17]，除此之外你还能看到一个旧的绞刑架，它曾被用来绞死叛徒。从绞刑架的位置开始，向橡树走去，记下走了多少步。到达橡树之后右转90°，再走相同数量的步数，在最后到达的位置钉下一根木桩。然后回到绞刑架的位置，向松树走去，同样记下走了多少步。走到松树之后左转90°，也是走相同数量的步数，再钉一根木桩。在两根木桩的中点挖掘，你就能找到宝藏。”

指示简洁明了，于是年轻人就租了一条船驶往小岛。他找到了小岛，找到了草地、橡树和松树，但让他极度沮丧的是，绞刑架不见了。由于时间太久了，风吹雨打腐朽了木头，将其化为尘土，绞刑架原来所在的位置没有留下任何痕迹。

我们这位爱冒险的年轻人陷入了绝望，这份绝望又进而转化为了狂乱，他开始在草地上到处乱挖。可是无论尽了多少努力都是徒劳的，岛太大了！所以他空手而归，而宝藏可能还在那里。

这是一个伤心的故事，不是吗？但更令人伤心的是，如果他懂一点数学的话，尤其是知道虚数的用法的话，他可能就能拿到宝藏了。

我们来看看能不能帮他找到宝藏，尽管于他而言为时已晚。

假设岛是复数平面，过两棵树画一根轴（实轴），在两棵树的连线中点画垂直于两棵树的连线的另一根轴（虚轴）（图11）。取两棵树之间一半的距离为单位长度，这样我们可以说，橡树在实轴上-1的位置，松树在$+1$的位置。

我们不知道绞刑架在哪儿，就用希腊字母Γ（大写的gamma）表示它的虚拟位置，因为这个字母长得像绞刑架。既然绞刑架不一定在两根轴上，那么Γ就应当是个复数：$\Gamma = a + bi$，a和b的意义在图11中有解释。

下面我们来做一些简单的计算，注意，要记得上文讲过的虚数乘法的规则。如果绞刑架在Γ，橡树在-1，它们之间的距离和方位就可以表示为$(-1)-\Gamma = -(1+\Gamma)$。同理，绞刑架和松树之间的距离则表示为$1-\Gamma$。为了旋转这两个距离——一个是顺时针旋转90°（右转），一个是逆时针旋转90°（左转），根据上文的规则，我们必须将其分别乘以$-i$和i，因而两根木桩的位置如下（图11）：

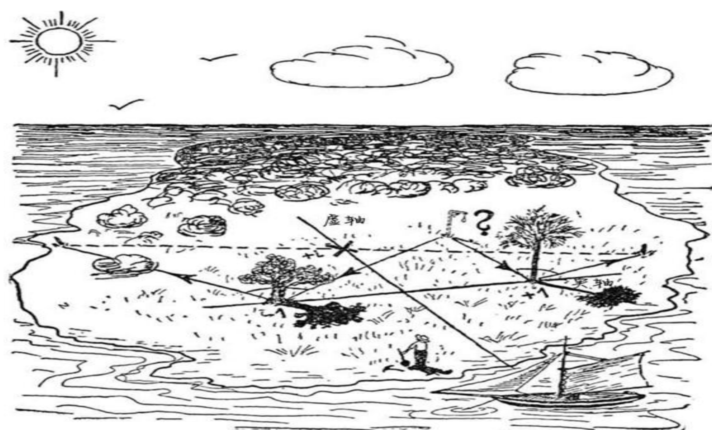


图 11

第一根木桩：$(-i)[-(1+\Gamma)]+1 = i(\Gamma+1)-1$

第二根木桩：$(+i)(1-\Gamma)-1 = i(1-\Gamma)+1$

因为宝藏在两根木桩连线的中点，我们需要将两个复数加起来乘上 $\frac{1}{2}$，于是有：

$$\frac{1}{2}[i(\Gamma+1)+1+i(1-\Gamma)-1]=\frac{1}{2}[+i\Gamma+i+1+i-i\Gamma-1]$$

$$=\frac{1}{2}(+2i)=+i$$

我们发现在这个过程中绞刑架未知的位置Γ已经相消了，那么无论绞刑架在哪里，宝藏必然都在＋i的位置上。

因此，如果我们那位爱冒险的年轻人懂得做这么一点点数学计算的话，他就根本不必挖掘整座岛，只需要在图11所预测的位置找寻宝藏即可，宝藏肯定就在那儿。

如果你还是不相信找到宝藏可以不必知道绞刑架的位置的话，你可以在一张纸上标注出两棵树的位置，然后假设几次不同的绞刑架的位置，按照羊皮纸上指示的方法去做。你一定会得到相同的点，那就是复数平面上＋i的那个点！

另一个我们依靠－1的平方根这个虚数发掘出来的隐藏宝藏是：我们的三维空间和时间可以被统一进一个四维的图景中，这个四维图景是由四维几何学规律所支配的。我们会在接下来的章节里探讨这个发现，同时我们还将探讨爱因斯坦（Einstein）的思想和他的相对论理论。

[1]　当今数学界认为质数和合数的定义范围是2及以上的整数，1既不是质数也不是合数，但如果不把1算作质数，那下文的内容就无法解释了（译注）。

[2]　哥德巴赫最早在写给欧拉的信中提出的是，任何一个大于2的整数都可以表示为三个质数的和。在现代数学定义1不是质数之后，哥德巴赫猜想的现代形式，是任何一个大于5的整数都可以表示为三个质数的和。本文提到的猜想是经欧拉进一步思考后提出的等价版本，又名“关于偶数的哥德巴赫猜想”，或“强哥德巴赫猜想”（译注）。

[3]　简单来说，自然对数可以被定义为常用对数（log10N）乘以2.3026。

[4]　在小学几何中，毕达哥拉斯证明了这一点：$3^2+4^2=5^2$。

[5]　亚历山大里亚城：即现在的亚历山大城（译注）。

[6]　丢番图：古希腊数学家，最先使用符号来代替文字表达，并在数论、代数方程解法等方面均有重要贡献。代表作：《算数》（译注）。

[7]　毕达哥拉斯（Pythagoras）：公元前580年—前500（490）年，古希腊数学家、哲学家，主要成就有毕达哥拉斯定理（勾股定理）等（译注）。

[8]　根据丢番图的一般规律（取两个数a和b，使得2ab是完全平方数。$x=a+\sqrt{2ab}$，$y=b+\sqrt{2ab}$，$z=a+b+\sqrt{2ab}$，然后就有x2＋y2＝z2，这用普通的代数很容易验证），我们可以建立一个包含所有解的表，开头几个如下：
32＋42＝52（埃及三角形）

52＋122＝132

62＋82＝102

72＋242＝252

82＋152＝172

92＋122＝152

92＋402＝412

102＋242＝262

[9]　本作成书于20世纪，故原文为“3个世纪之前”。后文中的类似内容不再作批注（译注）。

[10]　理想理论是抽象代数中环论下的一个理论，因较为复杂，有兴趣的读者可以自行研究，建议从抽象代数的基础，如群论开始慢慢了解（译注）。

[11]　狄利克雷，德国数学家，科隆大学博士，历任柏林大学和格廷根大学教授。柏林科学院院士。是解析数论的创始人，对函数论、位势论和三角级数论都有重要贡献。主要著作有《数论讲义》《定积分》等（译注）。

[12]　1995年，英国著名数学家安德鲁·怀尔斯完成了费马大定理的证明，所以下文的内容已经没有意义了（译注）。

[13]　其他数字的平方根也很好计算。例如 $\sqrt{5}$ ＝2.236…，因为2.236…×2.236…＝5；$\sqrt{7.3}$ ＝2.702…，因为2.702…×2.702…＝7.3。

[14]　证明如下：

$$(5+\sqrt{-15})+(5-\sqrt{-15})=5+5=10,$$

$$(5+\sqrt{-15})\times(5-\sqrt{-15})=(5\times5)+5\sqrt{-15}-5\sqrt{-15}-(\sqrt{-15}\times\sqrt{-15})=$$

$$(5\times5)-(-15)=25+15=40$$

[15]　现资料显示数学家欧拉为瑞士人。但他曾就职于柏林科学院，在德国生活了25年，并在此期间出版了他最著名的两部作品——《无穷小分析引论》和《微积分概论》（译注）。

[16]　经度和纬度的实际数值在文稿中是给出的，但本文将其隐去，以免这个秘密被传播出去。

[17]　基于上述理由，树的种类也被替换了。显然热带的藏宝岛屿

上会有很多种类的树。

第二部分：空间、时间和爱因斯坦

第三章 空间的独特性质

1.维度和坐标

我们都知道什么是空间，不过要是被问起空间的准确含义到底是什么，恐怕你就会尴尬了吧？

你也许会说，空间是笼罩于我们周围的，可以让我们前后、左右、上下运动的存在。三个互相垂直的独立方向的存在，代表着我们居住的物理空间的最基本的性质。我们的空间是三个方向的，或者说，是三维的。空间中的任何位置都可以用这三个方向确定。

如果我们拜访一座陌生的城市，询问酒店前台一家知名商行的办公室所在地，职员会说："向南走五个街区，右转再走两个街区，上七楼。"给出的这三个数字通常被称为坐标，在这个例子里指代的是城市街区之间、楼层之间以及与位于原点的酒店大堂之间的关系。显然，从其他任何地点也能给出前往同一目标地的方位，只需用新的坐标正确表达新的原点与目标之间的关系即可，而新的坐标也可以用旧的来表达，只需知道新旧坐标之间的位置关系，经过简单的数学代换就能获得。这个过程叫作坐标变换。

值得提醒的是，并非三个坐标都要数字才能表示某一距离，事实上，有时候用角度坐标要方便得多。

例如，纽约的街巷和大道的地址就常用直角坐标来表示，而莫斯科的地址则最好转换成极坐标——这座老城是围绕着位于中心的克里姆林宫建设的，街道从中心堡垒开始径向发散，并有数条同心圆大道环绕着中心。所以，说某幢房子"位于克里姆林宫西北偏北方向二十个街区远"，这样的描述就很正常。

另一个关于直角坐标和极坐标的经典例子，就是美国海军部大楼和位于华盛顿特区的美国国防部五角大楼，相信参与过二战的人对它们应该都很熟悉。

图12给出了用三种坐标系统表示空间中的点的位置的例子，其中有的是用距离表示的，有的是用角度表示的。但无论我们选择哪种坐标，我们都需要三个数据，因为我们存在于三维空间。

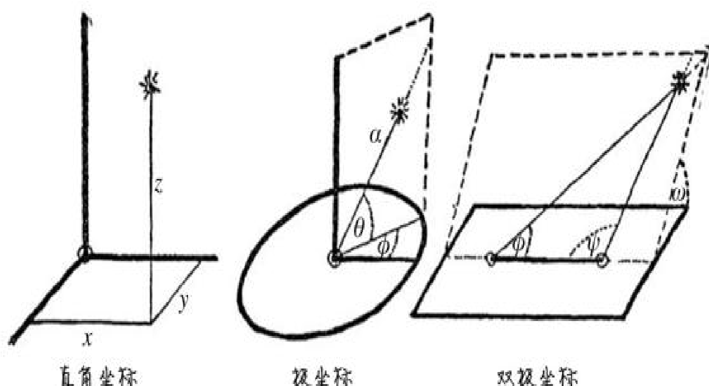


图 12

以我们的三维空间概念，我们很难想象比三维更高的超空间的样子（尽管我们将在后文看到，这种空间是存在的），不过我们很容易想象比三维低的子空间的样子。一个平面、一个球面或者任何平面，都是一个二维子空间，因为平面上的点只需要用两个数字来描述。与之类似的，一条线（直的或者弯曲的）是一维子空间，线上的一点只需用一个数字就可以描述。我们还可以说一个点是零维子空间，因为一个点上不可能出现两个不同的位置。不过，谁还在乎点呢！

作为三维生命体，我们发现理解线和面的几何性质非常容易，因为我们能“从外面”观察它们，而对三维空间的类似性质的理解就困难得多，因为我们是它的一部分。这就解释了为什么你可以理解“曲”线和“曲”面，却很难接受“三维空间也能弯曲”这个说法了。

不过，在经过一点点实践之后，当你理解了“曲率”这个词的真正含义时，你就会发现“弯曲的三维空间”这个概念确实很简单，而且到下一章的末尾，你甚至能（我们希望！）对“弯曲的四维空间”——这个第一

眼看上去很可怕的概念——侃侃而谈。

但在讨论那些之前，我们先来尝试一些有关三维空间、二维平面和一维曲线的事实的脑力体操吧。

2.无须测量的几何学

你对几何学的记忆应该来自你的学生时代，这是一门关于空间度量的科学[1]，它主要包含了大量有关距离和角度之间的数值关系的定理（比如毕达哥拉斯定理就是关于直角三角形三条边之间的关系的），然而事实上，与空间有关的大部分基本性质并不需要借助长度或角度的测量来规范。几何学里有关这些内容的分支叫作拓扑学[2]（analysis situs/topology）[3]，它是数学领域中最具刺激性的，也是最难的分支之一。

下面来举一个典型的关于拓扑学问题的简单例子。假设有一个完全闭合的几何面，例如一个球面，用一组线将其划分成一些单独的区域。你可以准备一张图，上面画着一个球，在球上随意取一些点，用不交叉的线连接这些点。那么，这些点的数目、连线的数目和区域的数目之间有什么联系呢？

首先，如果我们将这个球体压成一个南瓜状的扁球体，或者拉长成黄瓜那样的长条，显然点、线、面的数量是不会改变的（图13）。

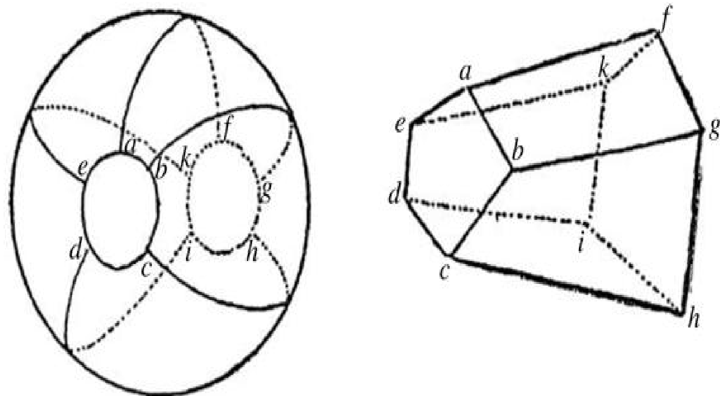


图 13

一个被划分成几块的球体变换成一个多面体。

事实上，我们可以取任何形状的闭合曲面，像随意挤压一个橡皮气球一样，只要不割破或撕裂它，上述问题的形式和解法都不会有丝毫的改变。这个事实表明，拓扑学中存在的数值关系与常规的几何学（例如线性维度的尺度、平面区域的表面积和几何体的体积之间的关系）有所不同，两者之间形成了鲜明的对比。当然，如果我们把一个立方体拉成了平行六边形，或者把球体压成了一个薄饼的话，这种关系也会出现严重的扭曲。

现在，让我们把这个被划分成了数个区域的球面按区域展平，使得这个球体变成一个多面体，这样一来划分边界的线就变成了多面体的棱，而原来的那些点变成了多面体的顶点。

这样我们之前的问题就能转化为（本质上却没有改变）“一个任意形状的多面体中，顶点、边和面之间的关系”的问题。

图14给出了五个正多面体，它们的每一面都有相同数量的边和顶点，还有一个仅仅依据想象画出来的不规则多面体。

我们可以数一下每个几何体的顶点、边和面的数量，这些数量之间有何关系呢？

直接数下来，我们可以得到下面的表格。

名称 V E F

（顶点的数量）（边的数量）（面的数量）

[illegible]正四面体（金字塔形）

[illegible]正六面体（正方体）

[illegible]正八面体

[illegible]正二十面体

[illegible]正十二面体

[illegible]“畸形体”

起初，表格中的三列（V、E和F）数字似乎没有确切的联系，但在稍做研究之后你会发现，V列加上F列总比E列多2。因此可以写下这样的数学关系式：

V＋F＝E＋2

那么，这个关系是只存在于图14给出的五个特定的正多面体中，还是对任何多面体都适用呢？如果你尝试画一下其他不同于图14的多面体，数它们的顶点、边和面，你会发现这个关系是普遍适用的。显而易见，V＋F＝E＋2是拓扑学中一条普适的数学定理，这个关系表达式与边长、面积的测量没有关系，只与涉及的不同几何单元（就是顶点、边和面）的数目有关。

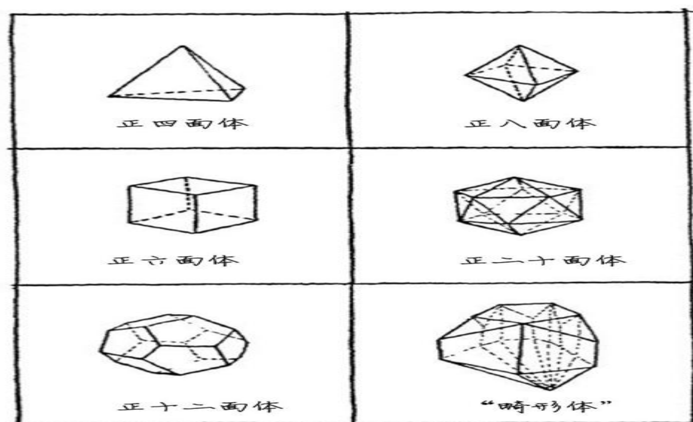


图 14

五个正多面体（它们只能是这样的形状）和一个“畸形体”。

我们刚刚发现的关于多面体顶点、边和面的数目的关系最早被17世

纪法国著名数学家内奈·笛卡尔（René　Descartes）注意到，而针对它的严谨证明则是后来由另一位数学巨擘欧拉完成的，这个定理被命名为欧拉定理。

以下是欧拉定理的完全证明，引自古朗特（R．Courant）和罗宾斯（H．Robbins）的著作《什么是数学？》（What　Is　Mathematics?）[4]，大家可以看看这项定理是怎么被证明的：

“为证明欧拉的公式，我们可以把给定的一个简单多面体想象成一个橡皮薄膜制成的中空体（图15a），如果把这个中空多面体的一面切掉，我们就可以扭曲剩下的几个面的形状，直至其展开成一个平面（图15b）。当然，这样一来每一面的面积和棱与棱之间的角度都会发生改变，但这个平面上的顶点和网状的边的数量仍然与原来多面体的顶点和边的数量相同，而多边形的数目则要比原来多面体的面的数目少1，因为我们切掉了一个面。

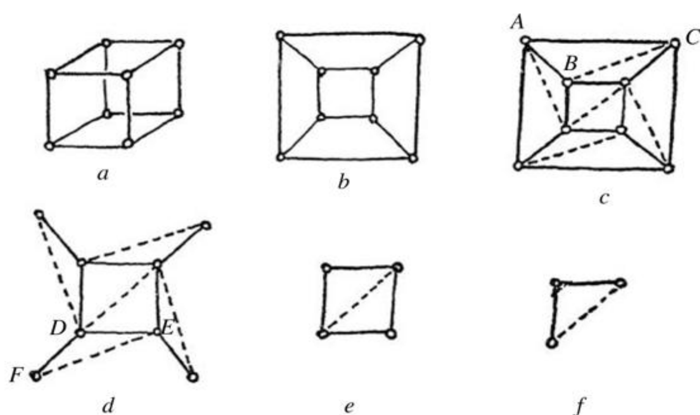


图　15

欧拉定理的证明。这里的图是特别对一个正方体而言的，但它适用于其他任何多面体。

现在我们可以用$V-E+F=1$来表示这个平面网络内的关系，因而，如果算上被切掉的面，对于多面体而言，其结果就是$V-E+F=2$。

“首先，我们将这个平面网络以如下形式‘三角形化’：给不是三角形的多边形加一条对角线。这样的作用是将E和F各增加1，$V-E+F$的值不变。我们继续画对角线，直到整个图形包含的全部是三角形（图

15c）。这个三角形网络中V－E＋F的值，与将其划分为三角形之前是相等的，因为增添对角线并没有改变这一数值。

“有些三角形的边在这个平面网络的边界上，它们中有的只有一条边在边界上，例如△ABC，而另一些则有两条边在边界上。我们将这些‘边界三角形’中不同时属于其他三角形的边去除（图15d）——即在△ABC中，我们移除边AC和整个面，只留下顶点A、B、C和边AB、BC；在△DEF中，我们移除整个面，以及两条边DF、FE和顶点F。

“对△ABC式的三角形的移除，使得E和F各减去1，而V不受影响，因而V－E＋F的值不变；对△DEF式的三角形的移除，使得V减1，E减2，F减1，最后V－E＋F的值依旧保持不变（图15e）。

“在进行了一系列这样的操作之后，我们一步步地去除了在边界上有边的三角形（每次移除都会改变下一次的可选项），直到最后只剩下一个三角形——三条边、三个顶点和一个面（图15f）。在这个最简单的平面网络中，V－E＋F＝3－3＋1＝1。

“我们可以发现，随着三角形的去除，V－E＋F的值从未改变。因此在最初的平面网络——那个缺少了一个面的多面体中，V－E＋F的值也必然等于1。所以我们可以总结，在一个多面体中，V－E＋F＝2。这就是欧拉的公式的完整证明。”

从欧拉的公式得到的一个有趣的推论是，只可能存在五种正多面体，也就是图14中给出的那五种。

仔细钻研一下前几页的讨论，你可能会注意到，在画出图14里的“各种各样的”多面体，和用数学方法证明欧拉定理时，我们做了一个隐藏假设，导致我们对多面体的选择受到了限制——我们受限于只能选择没有任何洞眼的多面体。这个洞眼指的不是类似撕开橡皮气球得到的洞，而是像甜甜圈或者橡胶轮胎中间的那种闭合的、连通两个相对面的洞。

粗看一眼图16你就会清楚了。这里有两个几何体，和图14里给出的一样，也是多面体。

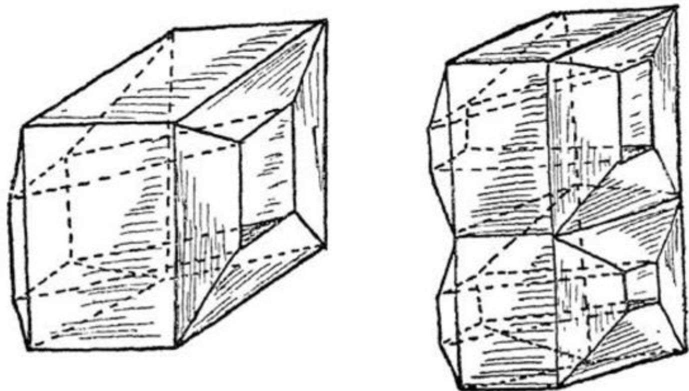


图 16

两个有洞眼的立方体，第一个有一个洞眼，第二个有两个。它们的面不都是矩形，但对于拓扑学而言，这一点是无所谓的。

我们来看看欧拉定理对这两个新的多面体是否适用。

于第一个而言，我们数出来总共有16个顶点、32条边、16个面，因此V＋F＝32，而E＋2＝34。于第二个而言，有28个顶点、46条边、30个面，因此V＋F＝58，而E＋2＝48。这又错了！

为什么会这样呢？我们得到的欧拉定理的普遍证明，为什么在这两个例子里就不适用了呢？

问题在于，我们可以把之前考虑的多面体看作足球球胆或气球，而新给出的中空多面体却更像是橡胶轮胎或者更复杂的橡胶制品。

数学证明无法应用于这种新型的多面体，因为我们无法对其进行证明过程中的几项必要的操作，即“将中空多面体的一个面切去，变形剩下的面直至其展开在一个平面上。”

如果你拿来一个足球球胆，用剪刀剪去其表面的一块，再完成上述的要求，这是没有困难的。但你不能用一个橡胶轮胎实现这一点，无论你怎么做。如果图16还不足以让你信服的话，就拿一个轮胎自己试试吧！

但你不要认为这种更复杂的多面体的V、E和F之间就不存在关系，

关系是有的，只是不一样罢了。对于甜甜圈类型的，或说得更科学点，对环面类型的多面体而言，这三者之间的关系满足V＋F＝E；而对于“椒盐脆饼”形[5]的多面体而言，这三者则满足V＋F＝E－2。总而言之可以概括为：V＋F＝E＋2－2N，其中N是洞眼的个数。

另一个与欧拉定理密切相关的典型拓扑学问题就是“四色问题”。

假设有一个球面，上面被划分出一些独立区域，需要我们给这些区域上色，要求是要满足任何两块相邻的区域（就是有公共边界的那些）的颜色都不相同。那么，想要完成这项任务所需的颜色种类最少是多少？

很明显，只有两种颜色是不够的，因为当有三条边界相交在一点时（例如图17中美国的弗吉尼亚州、西弗吉尼亚州和马里兰州的地图），我们需要给这三个州填充不同的颜色。

需要四种颜色的例子（德国占领奥地利时的瑞士地图）也不难找到（图17）。[6]

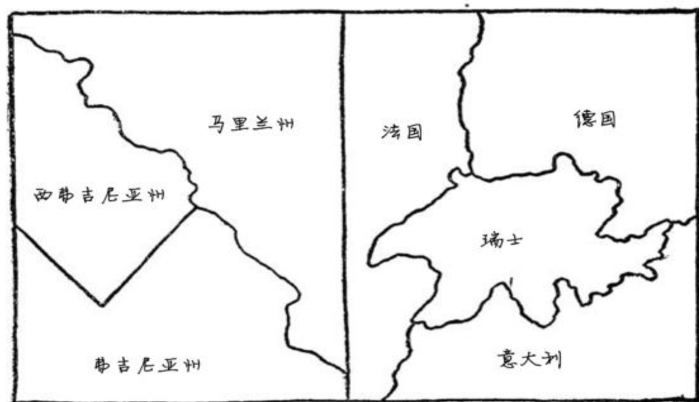


图 17

左：马里兰州、弗吉尼亚州、西弗吉尼亚州的地图。

右：瑞士、法国、德国和意大利的地图。

但无论你如何尝试，你永远都无法想象出一个需要超过四种颜色才能满足上述要求的地图，无论是在球面还是在平面[7]上。似乎无论我们

将地图设计成多复杂的样式，四种颜色都足以帮我们区分出一条边界两边的国家。

好吧，如果上面的结论是对的，那我们理应可以通过数学方法来证明它，可惜历经几代数学家的努力都没能得出证明结果。这是一个无人存疑，但又无人能够证明的数学问题的典例。已经有人用数学方法证明了五种颜色是足够的，这是目前为止最接近的成果。这个证明是基于欧拉关系得出的，已经应用于国家数、边界数，以及三个、四个等多个国家彼此相邻的点的个数的计算。

在此我们不再对五色理论给出证明，因为它过于复杂，加之对其进行讨论证明已经远远偏离了主要的话题，不过有兴趣的读者可以在很多拓扑学的书籍中找到关于它的证法，然后花一个愉快的夜晚（可能会是个不眠之夜）去研究它。

如果有哪位能够证明不需要五种颜色，只要四种颜色就足够了，或者对这一结论的真实性存疑，并成功画出一幅四种颜色还不够用的地图，只要能达成这两者之一的成就，那么他的名字就将被铭记于接下来数个世纪的纯粹数学史册上。

无比讽刺的是，在球面或平面上至今仍没能得出解法的填色问题，在例如甜甜圈形或者椒盐脆饼形这种更复杂的几何面上却被轻易解开了。

例如，已经有确凿的证明表明，在甜甜圈形状的表面上任意划分区域，仅需要七种颜色即可满足任意两个相邻区域不重色这一要求，而事实上也确实如此。

如果想再费点脑筋的话，大家可以拿一个充气的轮胎和七种不同色的颜料，然后尝试给轮胎表面的区域上色，使得每个区域周围的颜色都不同。在完成这些操作以后，他就可以说“我对甜甜圈形状心里有数了”。[8]

3.将空间翻个面

至此我们讨论的都是曲面，也就是二维子空间的拓扑学性质，而对于我们存在的三维空间，我们同样能问出相似的问题，不过在三维环境下的地图填色问题就转化为：我们要用不同材料的物质拼成一块镶嵌体，以保证任意两个相邻的物体都是不同材料的，这又需要多少种材料呢？

将球面或者环面的填色问题类比到三维空间会是怎样的情况呢？我们能否设想出一些特殊的三维空间来对应普通的三维空间，就像球面、环面与平面的对应关系一样呢？

乍一看这些问题似乎没有意义。事实上，就算我们能轻松想出各式各样的表面，我们还是会倾向于相信三维空间只有一种，也就是我们所熟知的这个我们生活的空间。然而这样的观点是危险的谬见。只要我们放飞想象力，我们就能想出与欧几里得的几何教科书里所研究不尽相同的三维空间。

我们之所以会难以想象出这种区别于常规认知的三维空间，是因为我们本身就是三维生物，我们只能从“内部”观察这个我们所生活的空间，而无法像观察二维曲面那样，可以从“外部”观察。但只要动动脑，我们就能轻而易举地征服这些问题。

我们先建立一个性质类似球面的三维空间模型。球面的主要性质就是它没有边界，但它的面积是有限的，它只不过是旋转一圈之后自己闭合了。那么我们能不能设想一个与之类似的，同样是体积有限但没有边界的闭合的三维空间呢？设想两个被限制在球面当中的球体，就像被苹果皮包裹的苹果那样。

现在我们来想象，让这两个球体“互相穿过”，并且使它们的外表面结合在一起。当然我们不是说把两个像苹果这样的实体互相挤压使它们互相穿过对方，它们的外表皮就能粘在一起——就是把苹果挤碎了它们也不可能互相穿透啊！

或者我们干脆想象一个被虫子咬出错综复杂隧道的苹果。

设想有两只虫子，一只是白的，一只是黑的，它们互相憎恶，不会进入对方的隧道，因而两条隧道互不相通，尽管它们的起点位置可能非常靠近。被这样两只虫子啃食的苹果最终可能就像图18这样，拥有两条布满整个苹果内部、彼此紧密缠绕的隧道网络。

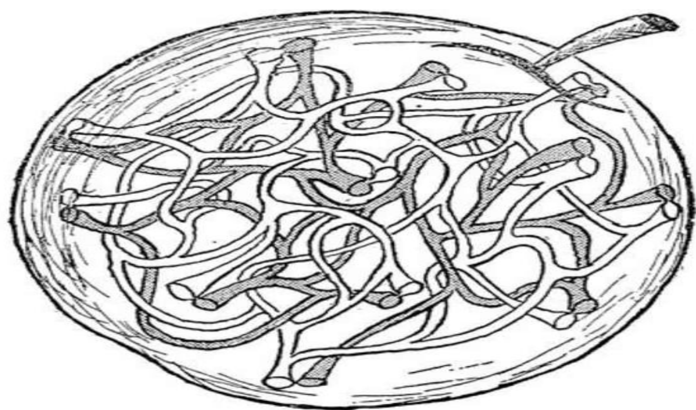


图 18

然而，尽管白虫和黑虫的隧道靠得非常近，但若想从其中一座隧道迷宫去往另一座，只能先回到苹果表面。

继续想象，如果两条隧道变得越来越细，也越来越复杂，最终整个苹果内部都会被两个重重叠叠的独立空间彻底填充，而它们彼此隔绝，只在表面相连接。

如果你不喜欢虫子，你可以参考在纽约举办的上一届世界博览会（简称世博会）[9]上的一个标志性的球形建筑里的双走廊双楼梯系统。里面的每一组楼梯都能够穿过整个建筑，但想要从第一组楼梯到达第二组楼梯，哪怕是邻近的两个位置，都需要到位于球面上的两组楼梯的交会处，再进入第二组楼梯。也就是我们说的，两个球体互相重叠但互不妨碍，即使你的朋友离你很近，但你想要见到他，和他握手，你就必须走很长的路！

需要说明的是，两组楼梯的交会处的构造与球内的任何一点并无不同，你完全可以将整个结构变形，将在外的交会处压到里面，而把球内的点外翻到球的表面。除此之外还要注意，尽管在我们的模型里两组楼梯的长度是有限的，但却不会存在“死胡同”，你在走廊或者楼梯中穿行

时不会撞到墙或者栅栏。如果你走得足够远，你将会发现自己又回到了起始点。

假使从外部观察整个结构，你可以说：一个人穿过了迷宫，最后又回到了他的出发点，这不过是因为走廊的方向逐渐扭转了。但对于身处其中的人来说，他们不会有“外部”的概念，于他们而言，空间就是一个有大小而无边界的存在。我们将在下一章看到，这种没有明显边界又并非无限大的“自封闭三维空间”，在讨论宇宙的整体性质时是非常有用的。

事实上，即使是在当今望远镜有限的观测下，我们对深空的观测结果也表明，那里的空间似乎开始弯曲了，空间表现出弯折回来并最终形成封闭空间的趋势，正如我们举的苹果那个例子中被虫子吃出来的隧道一样。但在探讨这些令人激动的问题之前，我们还需要了解空间的一些其他性质。

我们与苹果和虫子的故事还没完，下一个问题是——有没有可能把一个被虫蛀过的苹果变成一个甜甜圈？当然，我们不是说让它的味道变得和甜甜圈一样，而是要它的形状和甜甜圈一样。我们在讨论的是几何学，不是厨艺。

现在我们回到前面讨论过的双苹果的例子，也就是拿两个新鲜的苹果，让它们“互相穿过”，彼此的表皮“粘在一起”。假设一条虫子在其中一个苹果里咬出了一个宽敞的环形隧道，如图19所示。注意，是在其中一个苹果里，这样隧道外的每一点就都是同属两个苹果的双重点，而隧道内只有那个没被虫子咬过的苹果的物质（指果肉、果核等）。现在我们的“双苹果”有了一个由隧道的内表面组成的自由面（图19a）。

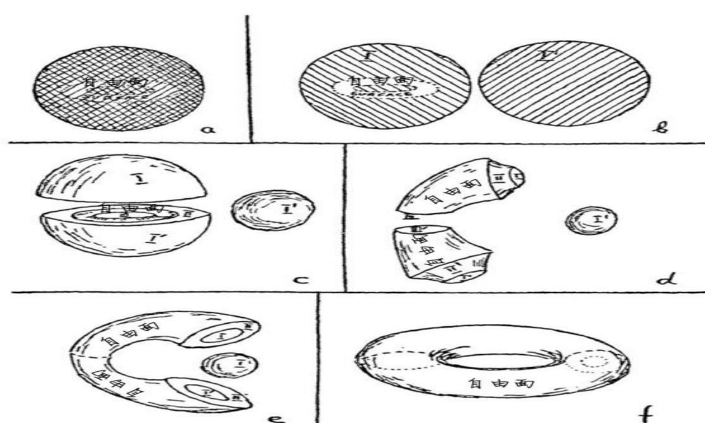


图 19

如何将一个被虫蛀过的双苹果变成一个完好的甜甜圈。这不是魔术，这只是拓扑学！

你能将这个坏了的苹果变换成一个甜甜圈吗？当然，前提是我们要假设这个苹果的材料是可塑的，你可以将其揉成各种形状，只要不出现裂口就行。为了便于操作，我们可以将苹果切开，不过等解构结束之后我们还是需要将其粘回去。

我们先去除将“双苹果”结合在一起的皮质，然后将它们分离开来（图19b）。我们将本来就没有连在一起的两个苹果的表面分别命名为I和I'，以便于在接下来的操作中进行标记区分，这样我们在结束之前就可以把它们重新粘在一起了。现在，把虫蛀过的部分沿着隧道切成两半（图19c）。这样又多出了两对新的表面，同样地，为了方便之后将它们粘起来，我们将其命名为II、II'和III、III'。这一步操作也将自由面暴露了出来，它也即将成为甜甜圈的自由面。

现在，将切开的两部分拉成图19d显示的样子。自由面被拉伸成很大的面积（根据我们的假设，这种材料就是可以任意拉伸的），相应地，被切开的面I、II和III的面积就缩小了。另外，我们在对“双苹果”中的一个苹果进行操作时，还需将另一个缩小到樱桃大小。现在，我们已经做好了将几个部分粘在一起的准备了。

首先，我们可以轻松地将III和III'粘到一起，得到的形状如图19e所示。然后将缩小的那一个苹果放在上一步得到的钳形结构的两端之间，

将两端合起来。这样，被缩小的球面I'就能和切开的面I粘在一起了，而被切开的面II和II'也自然地重新粘在了一起。最终我们获得了一个顺滑、精致的甜甜圈。

做上面这些有什么用呢？

说实话，没什么用。这只是为了给你的想象几何学能力做一点锻炼罢了，这种脑力体操会加深你对弯曲空间和闭合空间这类不寻常的东西的理解。

如果你还想让你的想象力跨越一大步，这里倒是有一个针对上述操作的“实际应用”。

其实你的身体也具有甜甜圈的结构，只是你可能从没想过这一点。实际上，在每个生命诞生的极早期（胚胎阶段），都会经过一个名为“胚囊”的阶段，它是球状形态，中间有一条宽阔的通道，食物从一端进入，其中有用的物质被身体消化吸收，剩余部分就从另一端被排出。随着生命体的发育，这个通道会变得更细更复杂，但基本原理依旧如故——甜甜圈形的几何性质没有变。

好吧，既然你也是甜甜圈，那就试试用图19的逆向方法变换你的身体（只是想想！），使自己成为一个有内部隧道的“双苹果”。你会发现你身体里重重叠叠的部分会构成“双苹果”的主体，而整个宇宙，包括地球、月亮、太阳和恒星，都被挤进了“苹果”中的环形隧道内！

你可以试着把你想象的样子画出来，如果你能画得很好的话——萨尔瓦多·达利（Salvador Dali）[10]大概都会称赞你是超现实主义绘画的权威了！（图20）

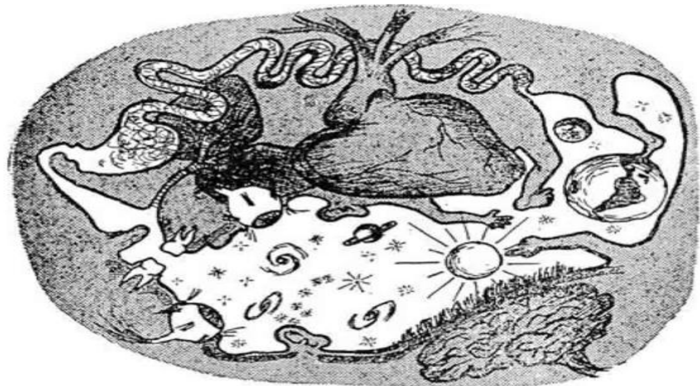


图 20

“翻过来的宇宙”。这幅超现实主义的画作表现的是一个行走在地球表面的人仰望星空的场景。原图经图19中演示的方式进行了拓扑学变换，因而地球、太阳和星星都被包裹进人体内的狭窄通道中，被他的内部器官所包围。

尽管已经说了很多了，但如果不讨论一下左手性和右手性物体，以及它们与空间的一般性质的关系，我们就还不能结束这一部分的内容。

这一问题从一副手套开始讲起会更好理解。

如果你对比一副手套中的两只（图21），你会发现两者虽然外表完全一致，但其实有很大区别——你不能把左手套戴在右手上，反之亦是如此。你可以随意旋转、扭曲它们，但右手套还是只能戴在右手上，左手套也只能戴在左手上。同样地，在鞋子、汽车的转向机构（美系车和英系车）、高尔夫球杆和其他很多东西上，也存在着左右手性。



图 21

右手性和左手性的物体看上去很相似，但实际上大有不同。

相对而言，诸如礼帽、网球拍和其他很多东西就没有这样的区别——毕竟没人会傻到去订购一组左手专用的茶杯。如果有人要求你去找邻居借一把左手用的扳手的话，那他绝对就是在耍你。

这两类东西的区别在哪儿呢？只要稍微想一下你就会发现，像帽子或者茶杯这一类的物体，它们都是对称结构的，你可以沿着对称线将它们切成相等的两半。但手套或鞋子就不存在这样的对称结构，你无法将其切开成两个相同的部分。如果一个物体没有对称面，我们就说它是非对称的，它可以被分成两类——左手性的和右手性的。这种区别不仅存在于手套或者高尔夫球杆这些人造物体中，在自然界中也很常见。

例如，有两种蜗牛，二者在其他方面都完全一样，只是建造自己“房子”的方式有所不同：一种的壳是按顺时针方向螺旋的，另一种是逆时针的。甚至在分子这种组成一切物质的微粒中，也存在着与左手套和右手套、顺时针螺旋和逆时针螺旋的蜗牛壳一样的左右手性。

当然，你看不到分子，但从晶体的形态及其具有的光学性质上也能看出它们的非对称性。比如，就有两种糖——右旋糖和左旋糖。而且，信不信由你，还有两种吃糖的细菌，每种细菌只吃对应类型的糖。

如上所说，似乎将右手性物体，比如一只右手套，转变成左手性物体是不可能实现的。但真的是这样吗？能不能设想出一种奇妙的空间，让左右手变换能够在那里实现呢？为解答这个问题，我们需要先从高级

的三维视角上观察平面中的扁平居住者。

如图22，图里展示了可能居住在平面世界的生命的例子——也就是只有两个维度的世界。那个提着一串葡萄的站立者是“正脸人”，因为他只有“正脸”，没有“侧面”。而那个动物则是一头“侧面驴”，更准确地说，是“右侧面驴”。当然我们也能画出“左侧面驴”，并且，因为它们都在平面上，所以从二维的视角来看，“左侧面驴”和“右侧面驴”之间的区别正如我们的三维空间中左右手套的区别一样，你不能将它们头并头地贴在一起，因为如果想要把它们的鼻子和尾巴分别贴在一起的话，你就必须将其中一只翻个四脚朝天，可是这样一来它就没法站立了。

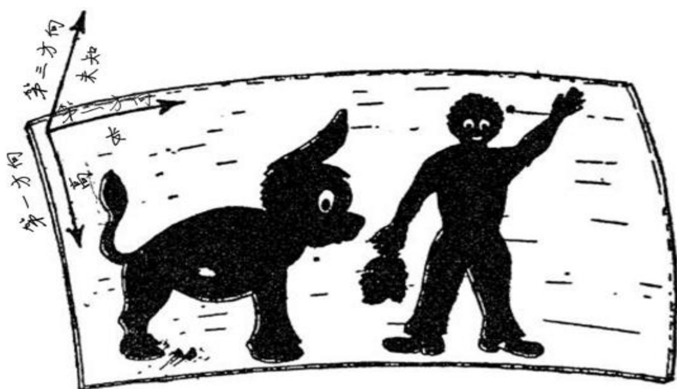


图 22

这是对一种居住在平面上的二维“阴影生命”的设想，这种二维生命不太“现实”。右边的人有正脸但没有侧面，他不能把手中的葡萄送到自己的嘴里。左边的驴子倒是很容易吃到葡萄，但它只能向右走，如果想向左走就只能倒退着走。虽然驴子倒退着走的情况并不罕见，但总而言之这种情况并不好。

但如果你将一头驴子从平面上拿出来，在三维空间中翻转它，再放回去，如此两头驴子就会是一模一样的了。

以此类推，我们可以说将一只右手套变成左手套的方法，就是将其从我们所在的空间中拿开，在第四维度中适当地旋转一下，然后再放回来。但我们的物理空间不具有第四维度，所以上述的方法恐怕是不可能实现了。那有没有别的方法呢？

好，我们再回到二维世界，但不再受限于图22那样的普通平面，而是研究所谓的“莫比乌斯面”的性质。

“莫比乌斯面”这个名字源于第一位研究它的德国数学家的名字。想要制作一个莫比乌斯面也非常容易，只要将一条纸带扭一下，然后再将其两端粘起来做成一个环就可以了。如图23那样。

这种面有很多诡异的性质，其中之一只需用一把剪刀将它沿着中线剪开（沿图23中的箭头方向），你就能轻易发现。显然，你会猜想这么做的结果无非就是把它剪开成了两个环。试一下吧，你会发现你的猜想完全错了：你还是只会得到一个环，而不是两个，只不过它的长度变成了原来的两倍，而宽度只剩原来的一半！

现在我们来看看如果“阴影驴”在莫比乌斯面上行走会发生什么吧。

假设它从位置1（图23）开始走——从这个位置看，它是一头“左侧面驴”。它走啊走，经过了位置2和位置3，你可以在图上清晰地看到，最终它又重新回到了它出发的位置。但无论是你还是它都会觉得奇怪，因为它现在正处在四脚朝天的尴尬境地（位置4）。它自然可以翻个个儿，让腿着地，但这样一来它的头就朝向另一个方向了。

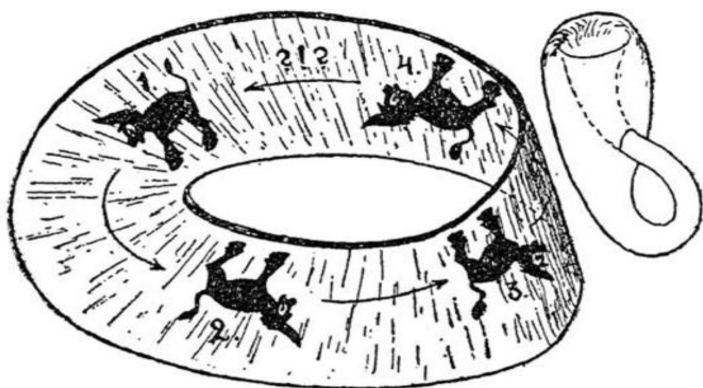


图 23

莫比乌斯面和克莱因瓶。

简而言之，只要在莫比乌斯面上转一圈，“左侧面驴”就可以变为“右侧面驴”了。

另外，别忘了，在这个过程中，这只驴子一直是留驻在平面上的，并没有到三维空间中进行翻转。因此我们发现，在扭曲的平面上，右手性的物体也是可以被转变成左手性的，反之亦然，只要让它们在这个扭曲面上走一圈就行了。图23所示的莫比乌斯环是另一种更为普通的表面的一部分，名为克莱因瓶（图23右侧）。它只有一个面，而且是闭合的，没有边界。如果这在二维平面上是可能的，那么在我们的三维空间中也一定存在着同样的情况，当然，这需要对空间进行一定的扭曲。我们无法像看“阴影驴”一样从外部看我们所在的空间，正所谓“不识庐山真面目，只缘身在此山中”。但“天文空间是封闭的，并且以莫比乌斯面的方式扭曲着”这件事并非不可能。

如果这是真的，那么，环绕宇宙一圈的旅行者将会带着一颗长在胸腔右边的心脏返回，而手套和鞋子的生产流程则会因此而简化很多——生产商们只需要生产一边的鞋子和手套，然后载着其中的一半环绕宇宙一圈，回来的时候它们就能和剩下的一半配成一对了。

伴随着这个奇妙的想法，我们结束了对奇异空间的不寻常性质的讨论。

[1] 几何学（geometry）的名字来源于两个希腊词汇ge＝earth（土地），或者说地面，meterin＝to measure（测量）。显然在构造这个词时，古希腊人的兴趣点在他们的房地产上。

[2] 拓扑学是研究几何图形或空间在连续改变形状后还能保持不变的一些性质的学科。它只考虑物体间的位置关系而不考虑它们的形状和大小（译注）。

[3] 这个词在拉丁语和希腊语中的意思均为对位置的研究。

[4] 笔者对古朗特和罗宾斯博士以及牛津大学出版社对再现以下段落的准许表示感谢。对本书中提出的拓扑学的基本范例有兴趣的读者可以在《什么是数学？》中找到更详尽的说明。

[5] 椒盐脆饼（pretzel）是深受欧美地区的人喜爱的一种零食，形状有点类似麻花（译注）。

[6]　在德国占领奥地利之前三种颜色就够了：瑞士涂绿色，法国和奥地利涂蓝色，德国和意大利涂黄色。
作者写作此书时正经历第二次世界大战，在战前纳粹德国吞并了奥地利（因为奥地利是希特勒的故乡），所以书中有这样的说法（译注）。

[7]　填色问题在平面上和在球面上的情况是相同的，因为当球面填色的问题被解决之后，我们只要在某个区域开一个小洞，将球面“摊开”在平面上就行了。这还是一个典型的拓扑学变换。

[8]　“甜甜圈”和“轮胎”都是指中间凹陷的多面体形状（译注）。

[9]　　本书初版写作的时间是第二次世界大战刚结束，纽约于1939年举办了世博会，之后第二次世界大战爆发，世博会停办，因而说“上一届”（译注）。

[10]　达利是20世纪西班牙著名画家，他的作品以超现实主义风格为主，与毕加索和马蒂斯并称为20世纪最具代表性的三大画家，代表作《记忆的永恒》（译注）。

第四章 四维的世界

1.时间是第四维度

四维的概念总是笼罩着诡秘和猜疑。我们这些只有长、高和宽的生命怎敢谈论四维空间呢？集结我们三维人的全部智力去设想更高的第四维度，现实吗？

一个四维的正方体或球体是什么样的呢？当我们说“想象”一头鼻子喷火、长着长长的尾巴、满身鳞片的巨龙，或一架带有游泳池、机翼上建着一对网球场的超级客机时，你会自然地在脑海中描绘出这些东西的样子。而你绘出的这些图片的背景，仍是我们熟悉的，所有物体，包括我们自身都处在其中的三维空间。如果这就是“想象”一词的含义，那么在三维空间的背景下想象四维空间，这件事自然是不可能的，就好像我们也不可能将一个三维物体压到平面上一样。

且慢，从某种意义上来说，我们其实可以通过把它们画下来的方式，将三维物体“挤”到平面上。不过，不论是用何种方式，我们都不会通过水压机这样的物理方法来实现，而是通过几何“投射”，或者说，“造影”的形式来完成。

如图24，你就能立刻明白这两种将物体（以马为例）挤压到平面上的方式的区别。

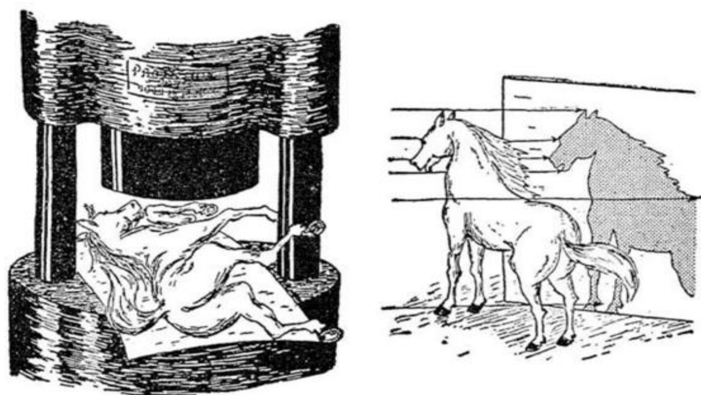


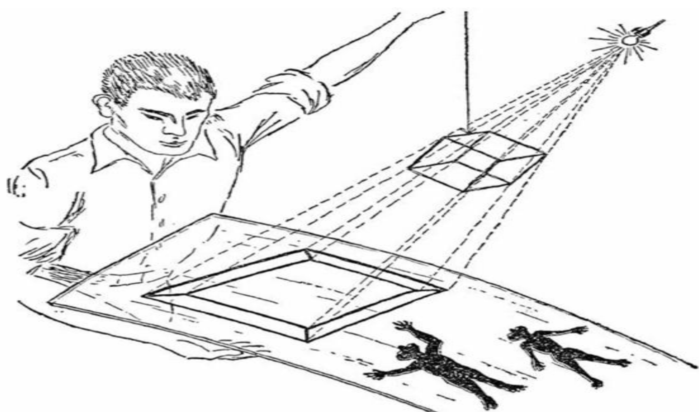
图 24

错误的和正确的将三维物体“挤压”到二维平面的方法。

用类比的方法我们可以说，我们虽然不能将四维物体完全“压进”三维空间里，但我们能将四维物体“投影”到我们只有三维的空间里。不过有一点你需要明白，如同三维物体的平面投影是二维的一样，四维的超物体投影到我们的正常空间后也应该是由立体形状来表示的。

为了更好地理解这个问题，我们先来设想一下居住在平面上的二维生命是如何看待三维立方体的——既然身为更高级的三维生命体，我们应该能够轻易地想到这一点。我们可以从第三个方向（相对于二维平面而言）居高临下地观察这些二维的世界。

将立方体“压进”平面的唯一途径是用图25所示的方法——将其“投影”到平面上。旋转立方体，观测它不同形式的投影，如此我们的二维朋友们就能够多多少少得到一些“三维立方体”这种神秘的物体的性质。他们无法“跳出”他们所在的平面以我们的方式来看待这个立方体，只能观测它的投影，例如，他们可能会说，这个立方体有八个顶点和十二条边。请看图26，你会发现，你与正在检视立方体在平面上的投影的可怜的二维生命，处在完全相同的境地。事实上，图片里这个正被一家人惊诧地研究着的古怪的复杂结构，正是四维超立方体在我们普通的三维空间中的投影。[1]


图 25

二维生命正诧异于一个三维立方体在他们所处的表面上投下的影子。

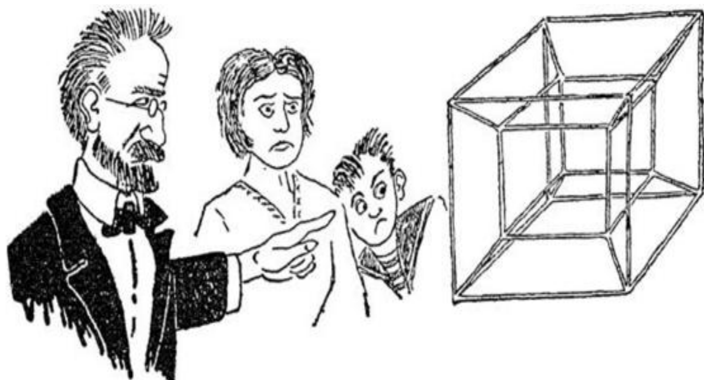


图 26

一位来自四维的访客！这是一个四维超立方体的直接投影。

仔细检查这个物体，你会很快发现，它和困扰着图25中的阴影生物的物体有着一样的性质：普通的立方体在平面上的投影呈现出两个正方形，其中一个正方形位于另一个的内部，它们顶点与顶点相连；而超立方体在普通空间中的投影也是由两个立方体构成的，同样是一个在另一个的内部，同样是顶点与顶点相连，这两种情况是类似的。数一数，你会很容易发现，超立方体总共有16个顶点、32条边和24个面。好一个正方体，不是吗？[2]

现在我们来看看四维球体长什么样。为了搞明白这个，我们不得不把目光转到一个更熟悉的例子上，也就是普通的球体在平面上的投影。

例如，设想一个透明的地球仪，表面绘有大洲和海洋，将其投射到一面白墙上（图27）。

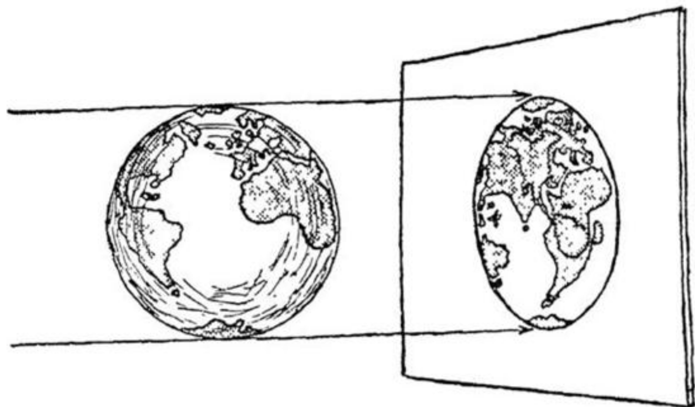


图 27

地球仪的平面投影。

在投影中，两个半球显然会重叠在一起，并且从投影的角度看，你会认为纽约（美国）到北京（中国）的距离很短，但这只是假象而已。事实上，投影上的每个点都表示实际在球面上两个相对的点。一架从纽约飞往北京的航班，如果是在投影的球面上移动，那么它就要先到达平面投影的边缘，再以相同的路径返回。尽管两条航线在投影图像上是重叠的，但其实它们位于地球仪上相对的两面，所以即使相遇也不会发生碰撞。

这就是普通的球体在平面上投影的一些性质。

再发挥一下想象力，你就能够想出四维超球体投影到三维空间中的样子了。

普通球体在平面上的投影是两个重叠放置的扁平的圆盘（点对点），它们的外沿相连，由此可以联想出，超球体的空间投影也一定是两个球体互相贯穿，并且外表面相连。但我们已经在前一章讨论过这种特别的结构了，当时是作为与封闭球面类似的封闭三维空间的例子而提出的。因而我们在这里要补充的是，四维球体的三维投影只不过是我们讨论过的，两个外表皮完全长在一起了的连体双胞胎苹果而已。

以此类推，用类比的方法我们就可以找出四维物体的许多其他性质，尽管我们无论如何都不可能在我们的物理空间中“想象出”四个独立的方向。

但如果你再多思考一下你会明白，根本没必要把第四个方向看得太过神秘。事实上，用一个我们每天都要用到的词就可以表示，并且也确实就是物理世界的第四个独立方向。没错，就是我们所说的“时间”。它和空间一起，经常被我们用来描述周围发生的事件。当我们谈论宇宙中发生的任何事情，无论是与朋友在街上的邂逅，还是遥远恒星的爆炸，我们都不会只说它在何地发生，还会加上它在何时发生。也就是说，我们在三个表示空间位置的方向要素的基础上，还加上了“时间”这一事实。

如果你进一步思考，你会轻易地发现，每个物理实体都有四个维度——三个维度属于空间，另一个维度是时间。所以你居住的屋子就是从长度、宽度、高度和时间上伸展的，时间的伸展自其建成之日起，至烧毁之日终。当然也可能是被某个拆迁公司拆毁，或因年久失修而坍塌。

不过，时间方向与空间的三维方向不尽相同。时间间隔由钟表测量，滴答声表示秒，叮咚声表示小时，而空间间隔是用尺子测量的。你可以用同一把尺子测量长度、宽度和高度，却不能把尺子变成钟表来测量时间的流逝。同样地，当你在空间中前进、右转或者向上时，你还可以返回原处，但你无法返回到某个时间点，你只能是被它强行地从过去带向未来。不过即使存在着上述区别，我们仍可以将时间看作描述物理世界事件的第四个维度，只是要注意，它和其他三个维度是有区别的。

当选择时间作为第四维度的时候，我们会发现，将本章开头提到的四维物件具象化就更容易了。还记得吗？那个由四维立方体投影而成的，有16个顶点、32条边和24个面的奇怪图形。也难怪图26里的人们会诧异地盯着这个几何怪物了！

然而，从我们全新的视角来看，一个四维立方体其实就是在一段时间内存在的普通的立方体（图28）。

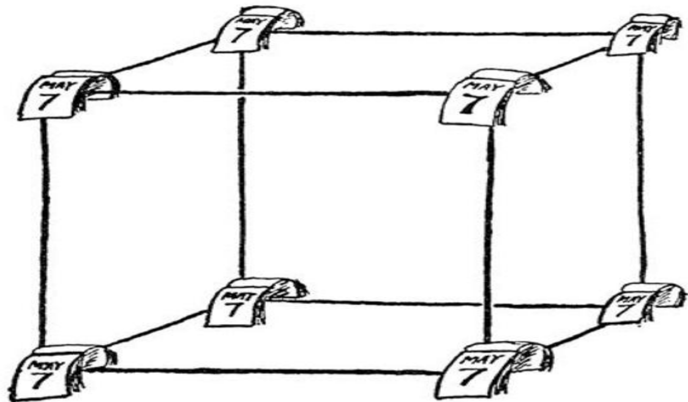


图 28

假设你在5月1日用12根铁丝创造了一个立方体，一个月后拆掉它，那么现在，它的每一个顶点都可以被视为一条在时间方向上伸展了一个月的线。你可以在每个顶点上放一本日历，每天翻一页，以显示时间的推进。

现在再去数四维形体的边的数量就容易多了。此时，你有12条在一开始就存在的空间棱，还有8条由8个顶点在时间上延伸而成的“时间棱”，以及在它被拆掉之时存在的12条空间棱[3]，总共32条边。以此类推，我们还可以数出总共有16个顶点——5月1日有8个空间顶点，6月1日也有8个。用同样的方法也可以数出面的个数，这一点就留给我们的读者作为练习了。不过要记住，其中一些面是立方体原本就有的面，而另一些是随着原立方体的棱在5月1日到6月1日的时间里伸展出来的“半空间半时间”的面。

这里所说的有关四维立方体的内容自然也可以应用在别的几何体上，或者任何有生命的、没有生命的物体上。

甚至，你可以把自己想象成一个四维形体，一根从出生那一刻开始在时间上延展，直到自然生命终结之时才停止的橡胶棒。可惜的是我们不能在纸上绘出四维物体的样貌，所以在图29中，我们尝试着用二维的阴影人来解释这一观点——取与他所居住的二维平面相垂直的空间方向作为时间方向，这样一来，图片展示的就是阴影人整个生命周期中的一小段。

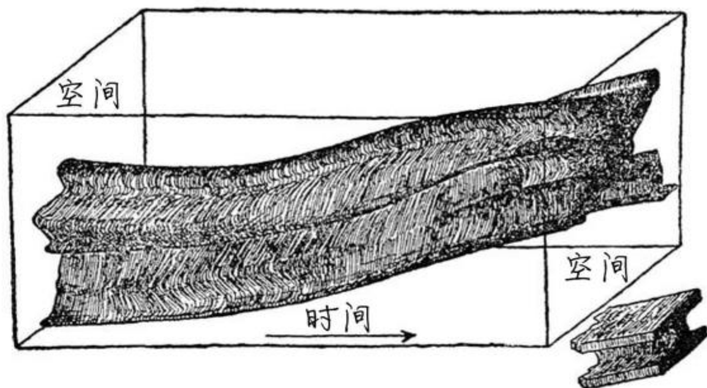


图 29

如果是整个生命周期的话，用来表示的橡胶棒应当长得多。这根橡胶棒在婴儿时期很细，随着年岁的增长而不断变化，最终在死亡之时固定不变（因为死人不会动呀），随后开始分解。

更准确地说，这个四维的棒是由大量独立的纤维聚集而成的，每一束都包含独立的原子。在整个生命周期中，大多数纤维都聚拢在一起，只有少数会脱落，如剪掉的头发和指甲。由于原子是坚不可摧的，因此人体死后的分解过程应该视为是独立的纤维丝在各个方向上逐渐游离的过程（构成骨骼的纤维除外）。

在四维时空的几何学语言中，表示每个单独物质微粒的历史的线，被称为“世界线”[4]。同样，组成某个物体的一系列世界线可以被称为“世界束”。

图30表示的是太阳、地球和一颗彗星的世界线的天文学实例。[5]如前面的例子所表述的，我们将时间轴垂直于二维空间的平面（地球轨道的平面）。太阳的世界线表示为与时间轴平行的直线，因为我们将太阳视为静止的。[6]以接近正圆的轨道运转的地球的世界线螺旋环绕在太阳的世界线周围，彗星的世界线也是如此，只不过它时而靠近太阳，时而远离。

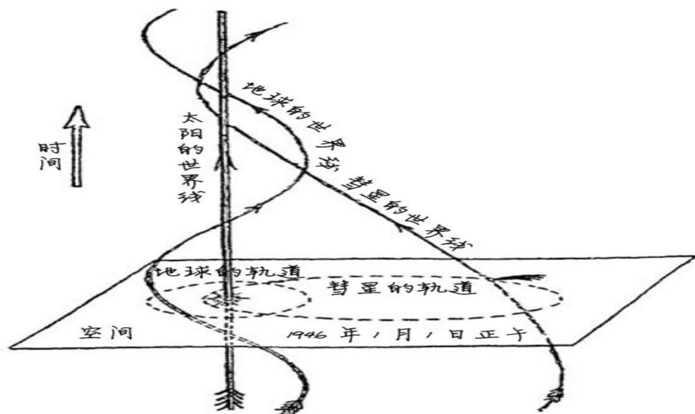


图 30

从几何学的视角看待四维空间，我们可以看到，宇宙的拓扑学图景和历史都融入了一幅协调的图画当中，当我们思考每个原子、动物和星星的运动时，我们只需研究一团纠缠的世界线就可以了。

2.时空等量

在把时间近似地当作三维空间的第四维度时，我们遇到了一个相当棘手的问题：当我们测量长度、宽度和高度时，我们可以使用同一个单位，如英寸或英尺。但时间间隔既不能用英寸，也不能用英尺来衡量，我们必须使用另一套单位，如分钟或小时。那么，它们之间该如何比较？如果我们设想一个长、宽、高都是1英尺的四维立方体，那么它在时间上该如何伸展，才能满足四个维度都相等呢？1秒？1小时？还是前文所说的1个月？1小时比1英尺长还是短？

乍看之下这个问题似乎毫无意义，但只需多想一想，你就能找到比较长度和时间间隔的合理方法。你应该经常听说，某人住在“离市中心20分钟公交车程”的地方，或者某地“只要坐5小时火车便可到达”，这时，我们将距离转换为了乘坐某种交通工具抵达所需的时间。

因此，如果我们能就某个标准速度达成一致，我们就能用长度来表示时间间隔，或者反过来也可以。

显然，被选为空间和时间的基本变换因子的标准速度，一定是永恒不变的，不受人类的主观意志或物理环境的客观变化的影响。物理学中唯一已知的拥有这种普遍性质的速度，是真空中的光速。

尽管人们通常称其为“光的速度”，但其实它更适合被称为“物理相互作用的传播速度”，因为任何一种作用在物体之间的力，无论是电磁相互作用还是引力，在真空中扩散的速度都是相同的。此外，我们将在后面说到，光速表示了任何物体能够达到的速度的上限，没有物体能在空间中以超光速运动。

最早尝试测量光速的，是17世纪意大利著名的科学家伽利略（Galileo Galilei）。

在一天夜里，伽利略与他的助手来到佛罗伦萨郊外的旷野，带着两盏装有机械遮光板的灯。两人相隔几英里，在某一时刻，伽利略打开他的灯，向助手闪烁一束光（图31a）。助手得到的指示是，当看到伽利略照向他的光时，就同时打开自己手中的灯。

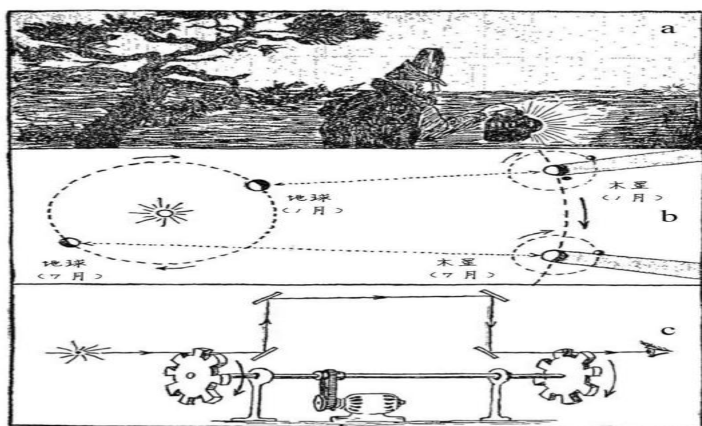


图 31

因为光线从伽利略那里到达助手所在的地方，再从助手处返回必然要花一点时间，所以自伽利略开灯到他收到助手的应答，这之间必定存在一定的延迟。的确，他留意到了这个很短暂的延迟，但当伽利略要求助手站在比之前的距离远两倍的位置上，再次重复实验时，却发现延迟时间并没有明显增加。这是理所当然的。光的速度飞快，穿越几英里的距离几乎是瞬间的事，而伽利略观测到的延迟其实是由于助手没能在看

到光线的同时就打开灯的原因——我们现在称其为反射延迟。

尽管伽利略的实验没有得到任何正面的结果，但他的另一项发现——木星的卫星，为后来第一次真正地对光速进行测量提供了基础。1675年，丹麦天文学家罗默（Roemer）在观测木星卫星的掩星时注意到，卫星隐入木星的阴影中的时间间隔不尽相同，而是随着当时木星和地球之间的距离变化而变化的。

罗默立刻意识到（你在研究了图31b之后也会明白）这个现象并非源于木星卫星的不规律运行，而仅仅是因为木星与地球间的距离发生了变化，才造成了卫星掩星的时间延迟。

我们可以从他的观测中得出，光速大约是185 000英里/秒。也难怪当初伽利略没能用他的灯测出光速，因为光从他的位置到助手那里再返回的时间，只要几十万分之一秒啊！

不过伽利略的这个原始的遮光板灯没有做到的事情，被之后改良的物理仪器实现了。图31c是法国物理学家菲佐（Fizeau）首先使用的能够在短距离内测定光速的设备。

它的主要部件是安装在同一根轴上的两个齿轮，当你从平行于轴的方向看去时，一个齿轮的齿正好对应着另一个的齿缝，因而一束平行于轴的光是无法通过齿轮的，无论轴怎样转动。假设这两个齿轮正在迅速旋转，由于光穿过第一个齿轮上齿牙之间的缝隙到达第二个齿轮的过程中需要一定时间，因此，如果在这段时间里将整个齿轮系统转动半个齿牙的距离，那么光线就能通过第二个齿轮了。这与一辆车以一定的速度行驶在装有定时红绿灯的大道上的情况很像。

如果齿轮以两倍速度旋转，那么第二个齿轮的齿牙就会挡住光线，而当速度再次提高，这个齿牙又会转过去，光线就又能通过齿缝了。因此，只要测量光线出现和消失之间对应的转速，就可以估计出光在两个齿轮间传播的速度了。为了能让实验更好地进行，也为了降低齿轮所需的转速，可以增加光在两个齿轮间行进的距离，如图31c所示，用几面镜子就可以实现。

在这个实验中，菲佐发现，当齿轮的转速达到1 000转/秒时，他能从他这一侧的齿轮上看到光线。这证明了，在这个转速下，光线从一个齿轮到达另一个齿轮时，齿轮的每个齿牙刚好转过了半个齿距。因为每个齿轮都有50个完全相同的齿牙，所以齿距的一半自然就是圆周的$\frac{1}{100}$，而光线走过两齿轮的时间，也就是齿轮转一圈的时间的$\frac{1}{100}$。将两者联系起来计算，菲佐得出光速是300 000千米/秒，或186 000英里/秒，这与罗默观测木星卫星得到的结果相近。

继这些先驱们的工作之后，科学家使用天文和物理方法又进行了大量的独立测量。当前得到的最准确的真空光速（用小写字母“c”表示）为：

c＝299 776千米/秒，或186 300英里/秒[7]

正因为光速如此巨大，所以才成为了测量天文距离时很方便的标准，如果用英里或千米来表示天文距离的话，恐怕要写满一整张纸了。因此，天文学家会说某颗恒星距离我们“5光年”，这与我们说某地距离我们“火车5小时车程”是一样的道理。因为一年包含31 558 000秒，所以1光年就是31 558 000×299 776＝9 460 000 000 000千米，或5 879 000 000 000英里。

像这样将“光年”用作测量距离的单位，实际上我们就已经把时间作为实际的维度，把时间单位用于衡量空间了。我们也可以倒转之前的步骤，取“光英里”，来表示光穿过1英里所需的时间。用上述光速的值，我们可以得出1光英里等于0.000 005 4秒。同理，1“光英尺”就是0.000 000 001 1秒。这样就能解答我们在前面的部分讨论到的四维立方体的问题了。

如果这个立方体的空间维度是1英尺×1英尺×1英尺，那它的空间间隔只有约0.000 000 001 1秒。如果这个尺寸都是1英尺的立方体存在了整整一个月，那就应该视其为在时间轴上延展了很长的四维棒。

3.四维距离

在解决了空间轴和时间轴应该用怎样的单位比较的问题后，我们就可以问自己，在四维的世界中，两点之间的距离应如何理解？要注意的是，现在我们所说的每个点都是“一个事件”，即空间与时间的组合。为了弄清楚这一点，我们以下面两个事件为例：

事件I：1945年7月28日上午9点21分，位于纽约市第五大道和50街相交处的一楼的一家银行被抢劫了[8]。

事件II：同一天的上午9点36分，一架军用飞机迷失在雾中，撞进位于纽约市第五和第六大道之间的34街的帝国大厦的79层。（图32）

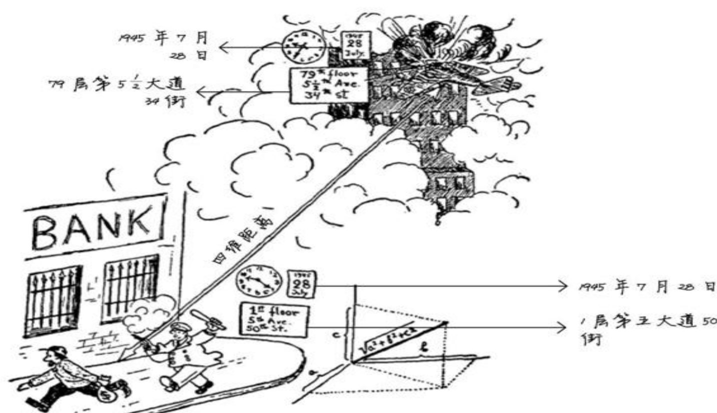


图 32

这两个事件在空间上南北相隔16个街区，东西相隔$\frac{1}{2}$个街区，上下相隔78层楼，在时间上相隔15分钟。显然，描述两个事件的空间距离时我们不必非要注意到大道和街区的数字以及楼层，因为我们可以运用大家熟知的毕达哥拉斯定理，将两点之间的坐标距离的平方和相加再开方，就能得到这两起事件发生地之间的直接距离（图32右下角）。为了能应用毕达哥拉斯定理，我们必须先将所有的坐标距离以相同的单位表示，例如英尺。

如果一个南北街区的长度是200英尺，一个东西街区的长度是800英尺，而帝国大厦一层楼的平均高度是12英尺，那么三个方向的坐标距离

就分别是：南北方向3　200英尺，东西方向400英尺，垂直方向936英尺。

应用毕达哥拉斯定理，我们得到的两个位置之间的直接距离为：

$$\sqrt{(3\,200)^2+(400)^2+(936)^2}=\sqrt{11\,280\,000}=3\,360\text{英尺}$$

如果时间是第四坐标的概念有实际意义，我们应该就能将空间距离的数值3360英尺，与时间间隔的数值15分钟相结合，得到两个事件之间四维距离的唯一数值。

根据爱因斯坦最初的想法，这样的四维距离可以简单地通过毕达哥拉斯定理得出，而且它在这两个事件的物理关系中扮演着比单独的时间和空间更基础的角色。

如果我们要将空间和时间的数据相结合，当然也必须用相同的单位来表达它们，就像我们需要用英尺来度量街区的长度和楼层间的距离一样。如前文所述，我们可以用光速作为转换因子来实现这一步，如此一来，15分钟的时间间隔就变成了800　000　000　000“光英尺”的空间距离。

对毕达哥拉斯定理进行简单的拓展，我们可以将四维距离定义为四个坐标（即三个空间坐标和一个时间坐标）的平方和再开平方根，这样就相当于我们完全消除了空间和时间之间的区别，承认了空间度量转换为时间度量的可能性，反之亦然。

当然，没有人——包括伟大的爱因斯坦——能用布遮上一把尺子，挥起魔棒，嘴里念着类似“时间来，时间去，变量，张量[9]，变”的咒语，就把尺子变成了一个闪闪发光的新闹钟！（图33）

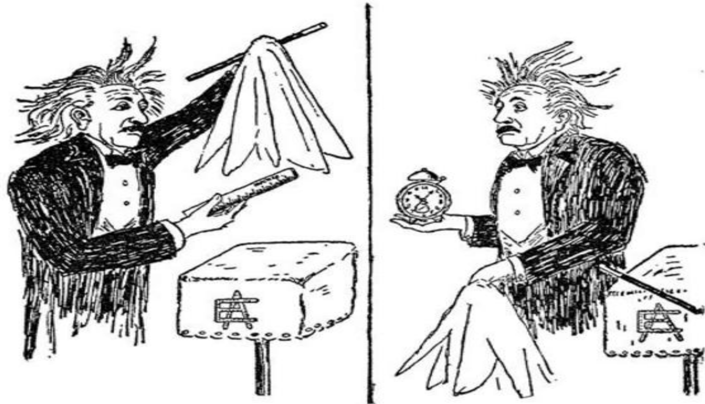


图　33

因此，如果我们要用毕达哥拉斯公式将时间和空间统一起来，我们就必须通过一些特殊的方式来保留它们的某些本质区别。

根据爱因斯坦的观点，在广义的毕达哥拉斯定理中，空间距离和时间间隔的物理区别可以通过在时间坐标的平方前加上负号来强调。因而我们可以将两个事件之间的四维距离写作“三个空间坐标的平方和减去时间坐标的平方”的形式，当然，时间坐标还是要转化成空间的单位。

那么，银行抢劫事件和撞机事件之间的四维距离就应该如此计算：

$$\sqrt{(3\,200)^2+(400)^2+(936)^2-(800\,000\,000\,000)^2}$$

第四项的数值相比前三项要大得多，因为这两个事件的例子取自我们的“日常生活”，而在日常生活中，符合我们认知的时间的单位确实很小。若想得到一组相近的数值，我们就不应只考虑纽约市内发生的事件，而应该在宇宙中取例。比如，我们可以取第一个事件为1946年7月1日上午9点整在比基尼环礁引爆的一颗原子弹，第二个事件是一分钟后落在火星表面的一颗陨石，这次的时间间隔为540　000　000　000光英尺，而空间距离约为650 000 000 000英尺。

这样一来两个事件之间的四维距离就是：

$$\sqrt{(65\times10^{10})^2+(54\times10^{10})^2}$$

$=36\times10^{10}$英尺，这在数值上与纯空间距离和纯时间间隔差别很大。

当然，有人会理所当然地反对这种看似不合理的几何学——为什么有一个坐标会与另外三个不同呢？但请不要忘记，任何一个被用来描述物理世界的数学系统，都必须合乎物体本身的性质，如果空间和时间在四维结合的过程中确实表现出不同的特质，那四维几何学定律也应按照它们的真实性质来塑造。此外，还有一个简单的数学方法，能将爱因斯坦的时空几何学与我们在学校里学到的欧几里得几何学完美地结合起来，就是将第四个坐标作为纯虚量来考虑。这个方法由德国数学家闵可夫斯基（Hermann Minkovskij）提出。

你应该还记得在第二章里，我们可以将普通数字乘以$\sqrt{-1}$从而转换成虚数，而这些虚数能够很好地解决很多几何问题。言归正传，根据闵可夫斯基，时间作为第四个坐标不仅要用空间单位来表达，还要乘以$\sqrt{-1}$。因此，上面的例子里得到的四个距离坐标就应该分别表示为：

坐标一：3 200英尺

坐标二：400英尺

坐标三：936英尺

坐标四：$8\times1011\times i$光英尺

现在我们可以将四维距离定义为四个距离坐标的平方和的平方根了。事实上，因为虚数的平方总是负数，所以闵可夫斯基坐标的毕达哥拉斯表述在数学上，与看似不合理的爱因斯坦坐标的毕达哥拉斯表述是相等的。

有这样一个故事，讲述的是一位患风湿病的老人，他询问他健康的朋友是如何预防这种病的。

朋友的答案是：“我每天早晨都要冲个冷水澡。”

“啊！”老人喊道，“那你是得了冷水澡病了！”[10]

不管怎样，如果你不喜欢爱因斯坦那种像“风湿病”一样的毕达哥拉斯定理，你可以冲一个“虚时间坐标的冷水澡”。

第四个坐标在时空世界里的虚数本质，必然会导致两种不同物理类型的四维间隔。

事实上，在我们上文讨论到的发生在纽约的两起事件中，因为事件发生地间的三维距离远比时间间隔要小得多（在合适的单位下），所以毕达哥拉斯定理下的根号里的数值其实是负的，所以我们得到的四维间隔其实也是一个虚数。但在另一些情形中，当时间间隔小于空间距离时，我们在根号下得到的就是正数了。很明显，这意味着这种情形下的事件间的四维间隔是实数。

因为前文中讨论过，空间距离是实数，而时间间隔是纯虚数，所以我们可以认为，实数的四维间隔与常规的空间距离关联更大，而虚数的四维间隔与时间间隔更为相关。根据闵可夫斯基使用的术语，前一种四维间隔被称为类空间隔（raumartig），后一种被称为类时间隔（zeitartig）。

在下一章中我们会看到，类空间隔可以变化为常规的空间距离，而类时间隔也可以变化成常规的时间间隔，只不过一种是用实数来表示的，另一种是用虚数来表示的，而这恰恰在两种数值之间筑起了一道不可逾越的壁垒——它们无法相互转化，因此我们也无法将尺子变成闹钟。

[1] 更准确地说，图26给出的，是四维超立方体在我们的空间中的二维纸面上的投影。

[2] 如果没数明白，请接着往下看，后面你会明白的（编注）。

[3] 如果不理解这一点，你可以设想一个有着4个顶点、4条边的正方形，将它沿着垂直于它所在平面（也就是沿第三个方向）的方向移动一段距离之后，你就又多出了四条边。

[4]　世界线：物理学家爱因斯坦提出的概念。他将时间和空间合称为四维时空，粒子在四维时空中的运动轨迹即为世界线（译注）。

[5]　这里说“世界束”更为恰当，但从天文角度来谈，你可以把恒星和行星当作“点”。

[6]　实际上我们的太阳也在相对别的恒星运动，因此次如果以另一个恒星系为参照，太阳的世界线应该是向一个方向倾斜的。

[7]　当前测出的真空光速为299　792　458千米/秒，于1983年确认（译注）。

[8]　如果这个街角真有一家银行，那肯定是纯属巧合了。

[9]　张量：张量理论是数学的一个分支学科。“张量”这一术语起源于力学，如今广泛应用于数学、物理学中（译注）。

[10]　这里是一个英文语法的小笑话，朋友回答的原文是“By taking a cold shower every morning all my life”，所以得风湿病的老人才会理解为朋友是因为得了“冷水澡病”才没有患上风湿病的（译注）。

第五章 时空相对性

1.空间与时间的互换

尽管我们借用数学将空间和时间归进同一个四维世界的尝试，并没有完全消除距离与间隔的差别，但相比在爱因斯坦之前的物理学理论对两个观念的认识，这些尝试已经揭示出了它们之间的许多共通之处。

其实，事件的空间距离与时间间隔，理论上不过是这些事件的基本四维间隔在空间轴和时间轴上的投影，所以，只要旋转四维坐标系，就会导致空间距离和时间间隔相互转换。但是四维坐标系的旋转又意味着什么呢？

首先请参考图34a中显示的由两组空间坐标组成的坐标系，假设有两个固定点，它们之间的距离为L，将这段距离投影到两条坐标轴上，我们发现两个点在第一条坐标轴上的距离为A，在第二条坐标轴上为B。

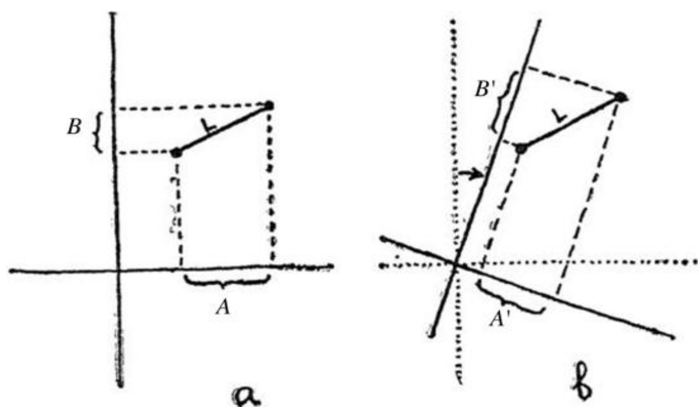


图 34

如果我们将坐标轴转动一定的角度（图34b），同样的距离L在新的坐标轴上的投影就会和之前的不同，我们用A'和B'表示。然而，根据毕达哥拉斯定理，两个投影距离的平方和的平方根在旋转前和旋转后仍旧相同，因为它们都等于两个点之间的实际距离，不会因坐标轴的旋转而改变。因此有：

$$\sqrt{A^2+B^2}=\sqrt{A'^2+B'^2}=L$$

所以我们说，投影距离的平方和的平方根不随坐标旋转而改变，而投影距离本身则取决于坐标系的选取。

现在我们将坐标系中的两条坐标轴分别对应空间距离和时间间隔。此时两个固定点变成了两个固定的事件，而轴上的两个投影分别表示它们在空间和时间上的间隔。我们就以上一章中提到的银行抢劫和撞机事件为例。

我们可以画一张图（图35a），就像表示空间坐标的坐标系那样（图34a）。那么，如果要旋转坐标轴，我们需要做些什么呢？这个答案会出乎意料，甚至是匪夷所思的：如果你想旋转时空坐标轴，就要先坐上一辆公交车。

好吧，假设在7月28日这个多事之日的早晨，我们真的坐在一辆行驶在第五大道的公交车的上层。我们首先感兴趣的，是银行抢劫事件的发生地点和撞机时间的发生地点距离公交车有多远，因为这个距离决定了我们是否能看到这两起事件。

现在请看图35a，公交车世界线的连续位置以及抢劫事件和撞机事件的发生位置都标示在了上面，你会立刻注意到这些距离与我们日常生活中的距离——比如说站在街角的交警记录下的距离——是不同的。

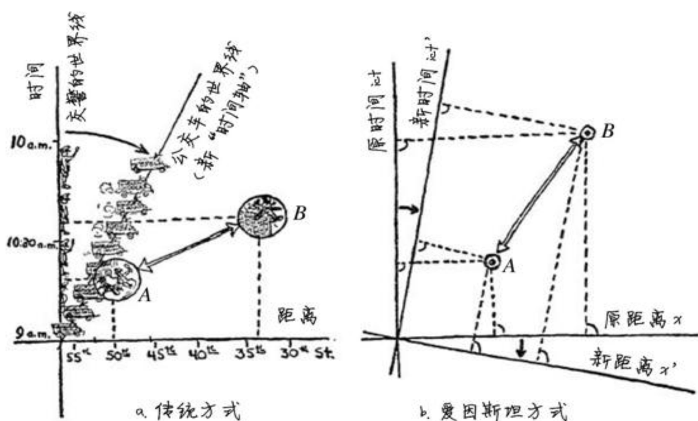


图 35

公交车在沿着大道前进，每3分钟通过1个街区（这样的速度在纽约繁重的交通中是司空见惯的！），从公交车的视角来看，两个事件的空间距离在逐渐缩短。实际上，9点21分公交车正穿过52号大街，此时正在发生的银行抢劫事件距此有两个街区远；到了撞机发生的时刻（9点36分），公交车在47号大街，与撞机现场相距14个街区。因而，如果以相对于公交车的距离计算，我们可以得到抢劫和撞机两起事件之间的空间距离是14－2＝12个街区，但如果使用城市建筑为参考的话，实际上这两起事件的距离是50－34＝16个街区。

再看一下图35a，我们发现在公交车上记录的距离不能像过去那样从纵轴（交警的世界线）来计量，而应该从表示公交车的世界线的斜线来计量，因此后者扮演的是新时间轴的角色。

总结一下刚才讨论的“琐琐碎碎”：在运动的物体上观测事件时，绘制的时空图的时间轴应旋转一定的角度（该角度取决于物体的运动速度），而空间轴保持不动。

这一说法，从经典物理学和所谓的“常识”的角度来看是不渝的真理，但在牵涉到四维时空世界时却不成立了——如果时间是独立的第四维度，那么时间轴应该永远垂直于三个空间轴，无论我们是在公交车上还是电车上，哪怕是走在人行道上！

此时我们只能遵从这两种思路的其中之一：我们可以保持我们对空间和时间的传统观念，放弃任何对统一时空几何学的进一步思考；或者，我们必须打破被“常识”统领的旧观念，假设我们时空图中的空间轴也会随着时间轴一同旋转，从而保证两者之间永远互相垂直。（图35b）

但是，还记得我们前面讨论过的，旋转时间轴意味着两个事件的空间间隔会产生不同的值（上例中12和16个街区），同样地，旋转空间轴意味着，在运动的物体上观测两个事件的时间间隔也会与在地面上的静止点观测的时间间隔不同。

如果以市政大楼上的时钟为准，银行抢劫事件和撞机事件之间应该是相隔15分钟，但是从公交车上的乘客戴着的腕表上读出的时间间隔却

有所不同——这不是由于机械装置的瑕疵造成的走时不准的问题，而是因为时间本身在不同运动速度的物体中流逝的速率就不同，从而导致机械装置记录的时间也相应地变慢了。尽管以公交车的低速度来说，这种迟缓几乎可以忽略不计。（本章后面的内容将对此进行深入讨论）

再举一个例子，想象一位正在行驶的火车的餐车里吃晚饭的男人。从餐车侍者的视角来看，这个男人在同一个地方享用了他的开胃酒和点心[1]（靠窗的第三张桌子）。但如果分别从两位站在静止的铁道旁向车内张望的两位道岔工的视角看，却是一个人看到他在喝开胃酒，另一个人看到他在吃点心——这两件事之间相隔了几千米的距离。

因此我们可以说：从一个观察者的视角来看发生在相同地点不同时间的两个事件，对于处于不同的运动状态的另一个观察者来说，发生的地点是不同的。

反过来，基于我们理想的时空等效的说法，将叙述中的“地点”与“时刻”互换，得到的结果是：从一个观察者的视角来看发生在相同时间不同地点的两个事件，对于处于不同的运动状态的另一个观察者来说，发生的时间也是不同的。

把这段话放进餐车的例子中就是，侍者看到分坐在餐车两头的两位乘客同时在饭后点起了一支烟，但这个描述从驻足在轨道旁的道岔工的嘴里说出会变成“这位乘客点了支烟，刚才前面那位乘客也点了支烟”。所以，对一位观察者而言同时发生的两个事件，在另一位观察者看来这中间可能是存在时间间隔的。

这些都是四维几何学的必然结果：空间和时间只是恒定不变的四维距离在其对应的轴上的投影。

2.以太风，和天狼星之旅

现在请问问自己，是否愿意为了使用这种四维几何学的语言，而在我们已经适应了的旧的时空观中引入革命性的变化？

若答案是肯定的，那我们挑战的，将是基于两个半世纪以前伟大的物理学泰斗艾萨克·牛顿（Issac　Newton）对时间和空间的定义所建立起的整个经典物理学体系——即“绝对空间，就其本质而言，与任何外在事物无关，总是恒定不变，不会运动”以及“绝对的、真实的数学时间，本质上是在均匀地流逝，与任何外在事物都无关”。

显然牛顿在写这些话的时候没有考虑过他在陈述什么新的观点，更没想过会引起什么争论，他只不过是将时空观念用精确的语言描述出来而已，任何有常识的人都会觉得这是理所当然的。事实上，正是由于人们对经典时空观如此地深信不疑，它才会被哲学家认为是先验的，也没有任何科学家（更不用说门外汉了）考虑过这一观念会不会是错的，是否需要重新检验和陈述。

那么，既然如此，为什么现在又要提起这个问题呢？

答案是：人们之所以放弃经典的时空观，将其统一为单一的四维图景，不是出于爱因斯坦式的纯粹美学的欲求，也不是爱因斯坦那天才的数学头脑所主张的，而仅仅是因为经典的独立时空图景已经无法解释我们在实验研究中不断得出的事实了。

对这座美丽夺目的、看似永恒的经典物理城堡的第一次冲击，是1887年美国科学家A.A.迈克尔逊（Albert　Abraham　Michelson）的一次看似平常的实验，这次实验几乎撼动了这座精巧的城堡的每一块石头，推倒了它的每一堵墙，就如同耶利哥的城墙在约书亚的号角下颤动一样[2]。

迈克尔逊实验的设想很简单，不过是基于光是运动在“光介质以太”（一种假想的充斥在整个空间中，占据物质的每个原子之间的空隙的东西）中的一种波这样一个物理图景。将石块扔进池塘，水波会向四周扩散，以此类推，明亮物体发出的光应当同样会向四周传播，振动的音叉发出的声音也应如此。然而，水面的波反映的是水中的粒子的运动，声波是声音在穿过空气或其他物质时产生的振动，但我们却找不到任何承载光波的物质介质。事实证明，光能轻易地穿过空间（相比声音），但空间似乎是完全虚无的！

在完全虚无的状态下谈论振动，这显然是没有逻辑的，因此物理学家只好创造了一个新的概念“光介质以太”，以便在解释光的传播时，能在“振动”一词前加上一个主语。单从纯粹的语法角度而言，“光介质以太”的存在不可否认。但是——这个“但是”要大声地说出来——语法规则没有，也无法告诉我们，为了构建正确的句子而必须创造出来的主语究竟有什么物理性质！

如果我们只是说“光是以波的形式在光以太中传播的，‘光以太’就是光波的介质，我们说的是绝对的真理！”，这也不过是絮絮叨叨的复述罢了。要了解光以太是什么，它有怎样的物理性质，这是完全不同的问题。此时语法（更不用说希腊语了！）根本帮不上忙，答案必须从物理科学中得出。

在接下来的讨论中我们可以知道，19世纪物理学研究中最大的错误，就是假设光以太的性质与我们熟知的普通的物理实体的性质是极其相似的。人们总是讨论到光以太的流动性、刚性、各种弹性，甚至说到它的内摩擦。也就是说，一方面，光以太在承载光波时是一个振动的固体[3]，另一方面，它对天体的运动又没有起到任何阻碍作用，显示出完美的流动性，就像火漆之类的物质一样。

然而众所周知的是，火漆及类似的物质在高速的机械力冲击下极易碎裂，但如果静置足够长的时间，它又能像蜂蜜一样自行流动。[4]以此类比，旧的物理学猜想，这种充满整个星际空间的光以太，在面对高速传播的光时表现为坚硬的固体，而在面对运动速度约为光速千分之一的行星和恒星时，又表现得像完美的液体一样，能够轻易被它们推开。

用这种拟人化的思考方式，试图将一种我们除了名字以外一无所知的东西归结于我们已知的普通物质的性质，这件事从一开始就是大错特错的。况且，无论进行了多少次尝试，我们都没有得到关于这种神秘的光波传播介质的性质的任何力学解释。

以我们现有的知识我们可以轻易看出这些尝试错在哪里——我们知道普通物质的所有力学性质都可以追溯到构成它们的原子之间的相互作用上，例如水的高流动性是因为水分子间几乎没有摩擦，橡胶的弹性是因为橡胶分子能够轻易变形，而钻石的硬度则是缘于构成钻石晶体的碳

原子被紧紧束缚在刚性结构中。因此，各种物质的所有的共同力学性质都是缘于它们的原子结构，但这条规律用在光以太这种被认为是绝对连续的物质上就毫无意义了。

光以太是一种特殊的物质，它和我们通常所说的已经为人熟知的物质原子的嵌套方式毫无相似之处。我们可以说光以太是“物质”（仅仅是因为它是动词“振动”的主语），也可以说它是“空间”，不过要记住，我们已经说过，之后还会提到，空间具有某种形态或结构特性，因而比欧几里得几何中的概念要复杂得多。事实上，现代物理中对“光以太”（不谈它的那些所谓的力学性质的话）的表述和“物理空间”是同义的。

我们已经扯太远了，居然开始从哲学的角度分析“光以太”了，现在我们得赶紧回到迈克尔逊的实验上去。

如前文所说，这个实验的设想很简单。如果光是穿过以太的波，那么在地面设置的仪器测得的光速必然会受到地球在空间中的运动的影响。也就是说，当我们站在地球表面，面朝地球围绕太阳运行的方向，我们应该能感受到“以太风”扑面而来，就像站在快速航行中的船的甲板上的人能感受到海风在拍打着他的面颊一样，即使当时的天气是无风的。

当然，我们感受不到“以太风”，因为它被认为是可以毫无阻碍地穿过构成我们身体的原子之间的空隙的，但我们应该能通过测量与我们运动相关的不同方向上的光速来探测到它的存在。大家都知道，声音顺风传播的速度要快于逆风传播的速度，那么光在以太风中传播的情况也应当是一样。

基于这一点，迈克尔逊教授设计了一套仪器，它能记录下向各个方向传播的光的速度上的差别。要实现这一点，最简单方法显然就是利用上文中描述过的菲佐的仪器（图31c），通过将其转向多个方向来完成一系列的测量。但这不是个理想的办法，因为每一次测量都要保证很高的精确度——由于我们预估的速度差（等于地球的公转速度）仅有光速的万分之一，我们必须以极高的精度进行测量。

如果你有两个差不多长的棍子，想知道它们之间的长度差具体有多

大，只需要将其并排放置，一端对齐，测量另一端的差度即可。这就是所谓的“零点”法。

迈克尔逊所使用的仪器的原理图如图36a所示，就是应用了这种零点法，来比较相互垂直的两束光的速度。

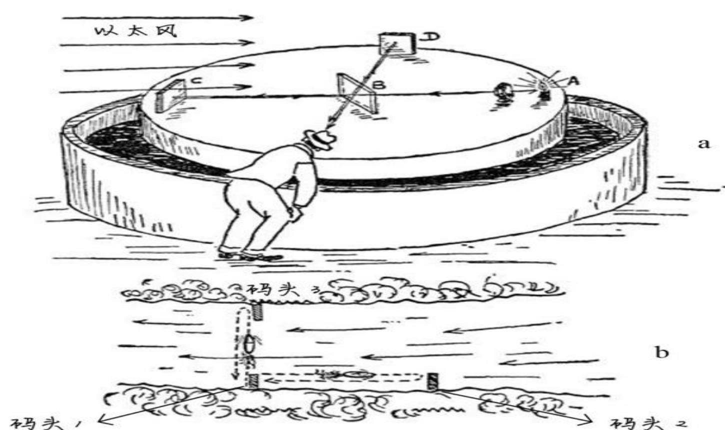


图 36

仪器的中心部件是一块玻璃片（B），覆有薄薄的一层半透明的银涂层，能反射50%的光，另外50%的光则会直接透过去。因此，来自光源A的光束被等分成了两部分，这两束光分别经与中心部件B距离相等的镜面C和镜面D反射，最终又回到B。

同样地，从D返回的光束中会有一部分穿透银涂层，而从C返回的光束中也会有一部分被涂层反射，这样一来，原本分离的两束光就再度会聚到观测者的眼中了。根据当时已知的光学定律，这两束光会相互干涉，形成一系列肉眼可见的明暗条纹。[5]如果BD和BC的距离相等，那么两束光就会同时返回到中心部件，因此明条纹应该处于画面的中央。如果这两个距离发生了微小的改变，导致一束光延迟到达，那么条纹就应该会向左或向右移动。

既然仪器是放置在地球表面的，而地球正在太空中飞速地运动，那么我们可以理所当然地猜测以太风正以等同于地球的运动速度吹过仪器。

假设以太风是由C吹向B的（图36b），想一想，这两束光线汇聚的时候会有什么不同？

不要忘了，其中一束光是先逆风前进，再顺风返回，而另一束则是横穿过风的。哪一束会先返回呢？

设想有一条河，一艘汽艇逆流而上，从码头1到码头2，然后再顺流而下回到码头1。水流在前半程起到了阻碍作用，而后半程则助了汽艇一臂之力。

或许你认为这两个效应会互相抵消吧，但事实并非如此。为了理解这一点，可以想象这艘船是以与水流相同的速度在行进，这样从码头1出发的船将永远到不了码头2！

不难看出水流的存在使得航程的时间增大了一个因子：

$$\frac{1}{1-(\frac{V}{v})^2}$$

v是船的速度，V是水流的速度。[6]因而，如果船速是水流速度的10倍，回程会耗时：

$$\frac{1}{1-(\frac{1}{10})^2}=\frac{1}{1-0.01}=\frac{1}{0.99}=1.01\text{（倍）}$$

就是比船在静水中的情况要多花1%的时间。

同样地，我们也能计算出横穿河流航行时的时间延迟。这个延迟主要是因为船从码头1到码头3时，必须要沿一条倾斜的线路行驶，以补偿流水造成的漂移。此时延迟要小一点，由以下因子决定：

$$\sqrt{\frac{1}{1-(\frac{V}{v})^2}}$$

也就是说，这种情况的耗时只比在静水中多出0.5%。要证明这个公式是很容易的，好学的读者可以自己去尝试。现在，把河流换成流动的以太风，把船换成行进的光波，把码头换成仪器尽头的两面镜子，你就会明白迈克尔逊实验的原理了。从B到C再返回B的光束会有延迟因子：

$$\frac{1}{1-(\frac{V}{c})^2}$$

c是指以太中的光速，而从B到D再返回B的光速的延迟因子是：

$$\sqrt{\frac{1}{1-(\frac{v}{c})^2}}$$

因为以太风的速度等于地球的运动速度，为30千米/秒，光速是3×105千米/秒，那么两束光应该分别延迟0.01%和0.005%。因此借助迈克尔逊的仪器，顺着以太风前进的光速和逆着以太风前进的光速之间的差异就能很轻易地被观测到。

你大概可以想象迈克尔逊的诧异，在进行实验时，他没有看到干涉条纹的哪怕一丁点偏移！

显然以太风对于顺着它传播或横穿过它的光的速度没有任何影响。

迈克尔逊震惊了，他本人起初并不愿接受这一事实，但重复进行实验后，结果依然如此，即使令人惊异，他最初得到的结果也是对的。

这个意料之外的结果的唯一可能解释是一个听起来很大胆的假设——安装了迈克尔逊镜面的那张巨大石桌在地球运动的方向发生了轻微的收缩[所谓的斐兹-杰惹收缩（Fitz-Gerald contraction）[7]]。事实上，如果距离BC收缩了因子：

$$\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}$$

而距离BD未发生改变，两束光的延迟将会相等，干涉条纹也就不会发生预想中的偏移了。

但是“迈克尔逊的桌子发生了收缩”这种可能提出来容易，解释起来却让人无从下手。诚然，我们遇到过物体在有阻力的介质中运动时发生收缩的情况，例如横渡湖泊的汽艇，就会在船尾的螺旋桨产生的动力和船头受到的来自水的阻力的双重作用下，发生轻微收缩。但这种机械收缩的程度取决于制造船的材料的强度，钢制的船受到挤压的影响要比木制的小。

然而在迈克尔逊的实验中，造成这种压缩的决定因素只可能是运动

速度，并不涉及材料的强度，即使装有镜子的桌子不是由石头制成，而是铸铁、木头或其他材料，收缩的量仍旧是一致的。

显而易见，我们遇到的是一种普适效应，它让所有运动的物体都收缩了相同的大小。或者，用爱因斯坦教授在1904年的话描述这一现象：我们遇到的是空间本身的收缩，而以相同速度运动的所有物体的收缩程度之所以相同，仅仅是因为它们被限制在同一个收缩的空间内。

前两章（第三章，第四章）中我们已经论述了不少关于空间的性质，所以这一陈述听起来是成立的。为了说明得更清楚些，可以把空间想象成类似具有弹性的果冻那样，我们能清楚地看到里面各种物体的边界。当空间受到挤压、伸展或扭曲变形时，所有限制在其中的物体也会自动发生同样的变化。必须将这种由空间变形引起的物体的变形，与物体因受到外力而引起的内部的应力变形区分开。图37显示了这种情况的二维模式，以便帮助理解这二者之间的重要区别。

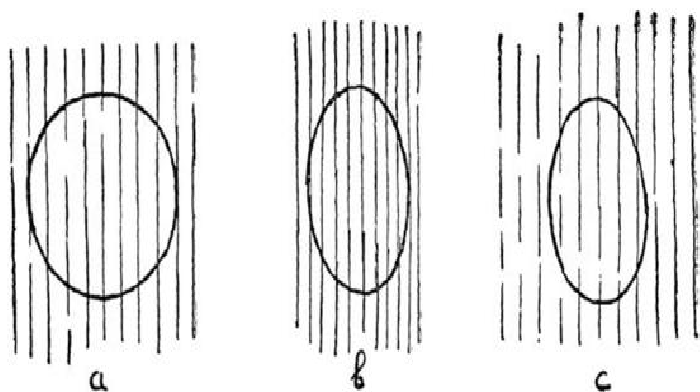


图 37

然而，尽管空间收缩的效应是理解物理学基本原理的重要基石，在日常生活中却很难被注意到，因为即使是我们生活中经历的最高的速度，相较于光速依然是小到可以忽略不计的。比如，一辆时速50英里的汽车收缩的长度因子是 $\sqrt{1-(10^{-7})^2}$ =0.999 999 999 999 99，仅相当于汽车车身的一个原子核的长度！一架以600英里/时飞行的喷气式飞机也不过是收缩了约一个原子的长度，而一枚以25 000英里/时的速度航行的长度为100米的星际火箭，其缩减的长度也只有0.01毫米。

不过，如果物体能以光速的50%、90%或99%运动，它们的长度就会分别缩减到静止时物体长度的86%、45%和14%。

一位无名作者所写的打油诗，很好地描述了快速运动的物体受到的相对性收缩的效应：

年轻小伙菲斯克，

剑术敏捷声名赫，

无人能追他动作，

斐兹杰惹空间缩，

长剑变成短刀个。

想必这位“菲斯克先生”的出剑速度一定是如闪电般快啊！

从四维几何学的角度来看，观测到的所有运动物体的普遍收缩，可以简单解释为它们不变的四维长度的空间投影因时空坐标轴旋转而引起的变化。你一定还记得前一部分的讨论吧，在运动体系中进行观测时，因速度不同，坐标中的空间轴和时间轴必须要转动一定的角度才能描述一件事情的始末。因此，如果有一个四维间隔百分之百地投影在了静止坐标系的空间轴上（图38a），那么它在新的时间轴上的空间投影（图38b）一定会更短。

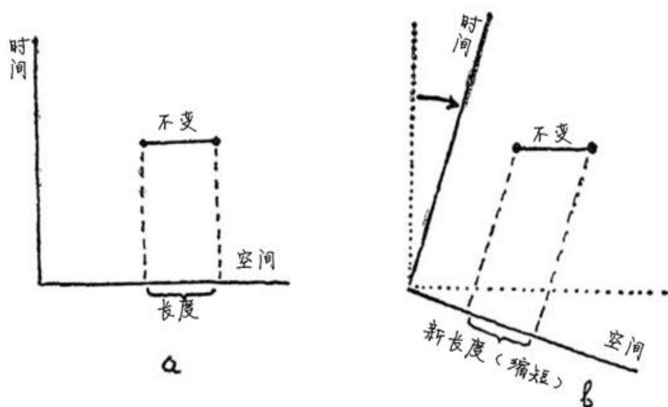


图 38

还要注意一个很重要的点，我们所预想的这个长度缩短只与两个系统间的相对运动有关。如果我们认为一个物体是与第二个坐标系统相对静止的，也就是说它在新空间轴上表示为一条不变的平行线，那么它在原空间轴上的投影也会缩短相同的比例。

因此，判定哪个系统是在“真正地”运动是没必要也没有物理意义的，有意义的只是它们之间的相对运动。如果未来有两艘某“行星际通信有限公司”的载人火箭飞船在地球和土星之间的某地相遇了，二者同以高速飞行，其中一艘飞船上的乘客会透过舷窗看到另一艘飞船明显地收缩了，但他们不会注意到其实自己搭乘的飞船也在收缩。我们去争论哪艘飞船“真的”收缩了毫无意义，因为无论从哪艘飞船上的乘客的视角看，另一艘都是收缩的，而自己乘坐的飞船都没有收缩。[8]

四维时空同样让我们明白了，为什么只有在物体的运动速度接近光速时，它们的相对性收缩才会变得显著。

事实上，时空坐标轴旋转的角度，是由运动系统走过的距离与其所需的时间之比决定的。如果我们以英尺为单位测量距离，以秒为单位测量时间，这个比率就是我们常用的速度单位英尺/秒。但因为四维世界的时间间隔是用普通的时间间隔乘以光速来表示的，决定旋转角的比率，实际上是以英尺/秒为单位的速度除以相同单位下的光速。因此旋转角度及其对距离测量的影响，只在两个运动系统间的相对速度接近光速时才变得显著。

与影响长度测量的方式相同，时空坐标轴的旋转还影响了时间间隔的测量。可以确定的一点是，由于第四坐标的虚数本质[9]，当空间距离缩短时，时间间隔会变长。如果你有一个闹钟，把它装在快速行驶的汽车上，它发出的“嘀答”声的间隔会变长，走得也会比在地面上慢一些。同长度的缩短一样，运动时钟的变慢也是一种普适效应，它只与运动速度有关——无论是现代的腕表还是祖父那有摆的旧样式座钟，甚至是流淌着沙粒的沙漏，在相同的运动速度下都会减缓相同的时间。

这种效应当然不会只限于我们所说的“钟”和“表”这样的特殊机械，实际上所有的物理、化学和生物过程都会减缓相同的程度。所以不必担心你在快速航行的火箭飞船里煮蛋时，会因为手表变慢而煮过头，因为

鸡蛋变熟的过程也会相应地变慢，所以依照你的手表将鸡蛋放在沸水里煮5分钟，你还是会得到我们平时的“五分钟蛋”[10]的。

在这个例子里我们用火箭飞船做背景而不是用火车的餐车，是因为就像长度收缩的例子所示的那样，时间的膨胀也只会在速度接近光速时才凸显出来。时间膨胀的因子与空间收缩相同，也是

$$\sqrt{1-(\frac{v}{c})^{2}}$$

区别是该因子用在空间收缩中是相乘，而用在时间膨胀中是相除。如果物体运动得飞快，以至于长度缩短为原来的一半，那么相应的时间间隔就会增长至原来的两倍。

运动系统中时间速度的减缓在星际旅行中会有一个有意思的影响：如果你决定拜访天狼星[11]的一颗卫星，这颗卫星距离太阳系有9光年，你乘坐一艘速度和光速一样快的火箭飞船，理所当然地，所需的往返时间自然至少要18年，于是你打算携带大量的食物。但事实却是，如果你的飞船真的能让你以近乎光速的速度航行，那么这种预防措施就完全是多余的。因为如果你以99.999 999 99%的光速行进，相应地，你的腕表、你的心脏、你的肺、你的消化系统以及你的思维，都会减缓至现在的1/70 000，所以往返天狼星所需的18年（从留在地球上的人的视角看），于你而言只不过是几个小时而已。倘若你在早饭后从地球出发，那么当你的飞船着陆在天狼星的某颗行星上时，你才刚想吃午饭而已。如果你着急返回地球，午饭后就出发，那么你很可能来得及赶回到地球吃晚饭。

不过还有一点，如果你忘记了相对论原理，你到家的时候一定会大吃一惊——在你迷航在星际空间的这段时间里，你的亲朋好友已经吃过6 570顿晚餐了！因为你是以如此接近光速的速度在旅行，18个地球年在你看来不过是1天而已。

但如果说尝试超越光速呢？这个问题的部分答案可以在下面的另一首关于相对性的打油诗里找到：

年轻女子布莱特，

步履如风快过光。

一日启程出游去，

爱因斯坦指点说，

昨夜早已归家来。

的确，如果速度接近光速时运动系统里的时间就会变慢，那超光速就应该能让时间倒流啊！除此之外，由于毕达哥拉斯根式中算术符号的变换，超光速系统中的时间坐标会变为实数，表示空间距离，而长度则会穿过零而变成虚数，表示时间间隔。

如果这是可能的，那么图33中展示的爱因斯坦将尺子变成闹钟的行为，便也能成真，只要他的速度超过光速就行！

然而，纵使物理世界再疯狂也不会如此夸张，这种黑魔法一样的表演自然是不可行的。简而言之就是，任何物体的运动速度都不可能等于或超越光速。

这一基本自然规律的物理基础在于，大量的直接实验[12]证明，当运动物体的速度接近光速时，它们的所谓惯性质量，也就是测量到的它们对加速过程的机械阻力，将增长到无限大。因此，如果一颗左轮手枪的子弹以99.999 999 99%的光速运动，那么阻止其自身继续加速的阻力将相当于12英寸的炮弹的质量。也就是说，当速度达到99.999 999 999 999 99%的光速时，这颗小小的子弹所受阻力，将相当于满载的卡车的质量的惯性阻力，此时无论再给这颗子弹加上多大的力，我们都无法征服小数点后的最后一位数，让它的速度恰好等于宇宙中所有运动的速度上限！

3.弯曲空间，和引力之谜

在磕磕绊绊地读完上面十几页有关思维坐标系的内容后我们可怜的读者一定十分难受，对此我深表歉意，现在我邀请各位去弯曲空间散个

步。

大家都知道曲线和曲面是什么，但“弯曲空间”的表述有什么含义？

想象这一现象的难处不在于这个概念的古怪，而在于，我们能够轻易地从外部观察曲线和曲面，但因为我们身处三维空间中，所以观测三维空间的弯曲只能从内部进行。为了尝试理解，三维的人类应该如何思考我们所居住的空间的弯曲问题，请让我们首先换位思考一下，居住在平面上的二维阴影生命会如何设想这种假想情况。

在图39a和39b中我们看到，在“平面世界”和“曲（球）面世界”上的阴影科学家正在研究他们的二维空间的几何学。他们能够研究的最简单的几何形体必然是三角形——这个由三条直线段连接三个几何点构成的简易图形。大家在中学时就已经知道了平面上任何三角形的内角和都是180°，但不难看出，这一定理并不适用于球面上的三角形。确实，一个由两条经线和一条纬线（这里借用了地理学的概念）组成的球面三角形，本身就有两个直角，而另一个角可以是0°到360°之间的任一角度。例如图39b中的两位阴影科学家研究的三角形，其三个内角的和就是210°。因此我们可以看到，只需测量二维世界中的几何形体，阴影科学家就能发现平面的曲率，而不用特地跑到外面来看。

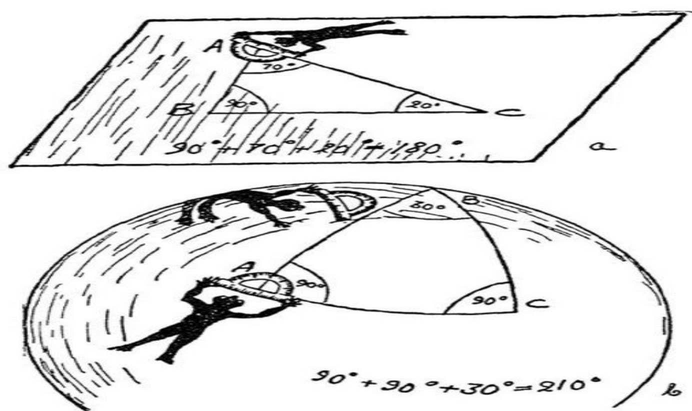


图 39

在“平面世界”和“曲面世界”上的二维科学家对有关三角形内角和的欧几里得定理进行核验。

将上述观测应用到更高维度的世界里，我们就可以自然而然地得出

结论：居住在三维空间里的人类科学家，可以通过测量空间中三条直线间的角度就轻松得到空间曲率，而不用跳到四维空间去看——如果这三个角之和是180°，那么说明空间是平的，否则就证明我们的空间是弯曲的。

但是在我们进一步探讨这些之前，我们需要搞清楚直线这个表述究竟是什么意思。请看图39a和39b中显示的两个三角形，读者可能会说：“尽管平面上的三角形（图39a）的三边确实是直线，但球面上的三角形（图39b）的三边是弯曲的啊，是围绕球面的大圆[13]上的一段弧。”

像这样基于我们常识的几何概念，会使得“阴影科学家”无法发展出二维空间的几何学。对直线的概念需要一个更普适的数学定义，使它不仅能在欧几里得的几何学中成立，还能扩展到性质更复杂的表面或空间中去。这样的普适定义可以是：“直线”是两点之间的最短距离，这两点取决于它们所在的表面或空间。在平面几何中，上述定义自然是与我们通常认为的直线一致；而在更复杂的弯曲表面上，这样的“直线”则有许多条，它们在自己的空间中与欧几里得几何中的“直线”扮演着相同的角色。为避免产生误解，我们通常将曲面上表示最短距离的线条称为测地线，这一说法最初源自大地测量学，也就是测量地球表面的科学。事实上，当我们谈及纽约和旧金山之间的直线距离时，我们想象的是沿着地球表面的弧度像乌鸦一样“笔直地飞过”，而不是有个巨大的钻头钻开地球从内部直接达到。

上述对“广义直线”或“测地线”的定义，即两点间的最短距离，向我们展示了画出“直线”的简单物理方法——在两点间拉起一根绳子。如果你在平面上这么做，你会得到我们通常认为的直线；如果你在球面上拉绳子，则会发现，绳子将沿着球面的大圆弧伸展，也就是球面的测地线。

我们也可以通过类似的方法来获知，我们所生活的三维空间究竟是平坦的还是弯曲的。我们所要做的，只不过是选取空间中的三个点，在它们之间拉上一条绳子，然后看看形成的三角形的三个内角和是不是180°。但是为了做成这个实验，我们必须记住两点：其一，实验必须在

大尺度上进行，因为即使是弯曲表面或空间中的一小部分，看上去也可能是很平坦的，显然我们不能只在自家后院做实验就得出地球的曲率！其二，表面或空间上可能会有某些区域是平坦的，因而我们有必要进行全面的测量。

爱因斯坦在创立广义弯曲空间的理论时，提出了一个伟大的假设：临近大质量物体的物理空间会发生弯曲，质量越大，曲率越大。为了证明这个假设，我们可以在一座高山周围钉上三根木桩，用绳子两两连接每根木桩（图40a），然后测量每两条绳子相交的角度。你尽管去挑一座最大的山——甚至是喜马拉雅山脉中的一座，最终你会发现，在允许的测量误差范围内，绳子相交的角度之和会正好等于180°。

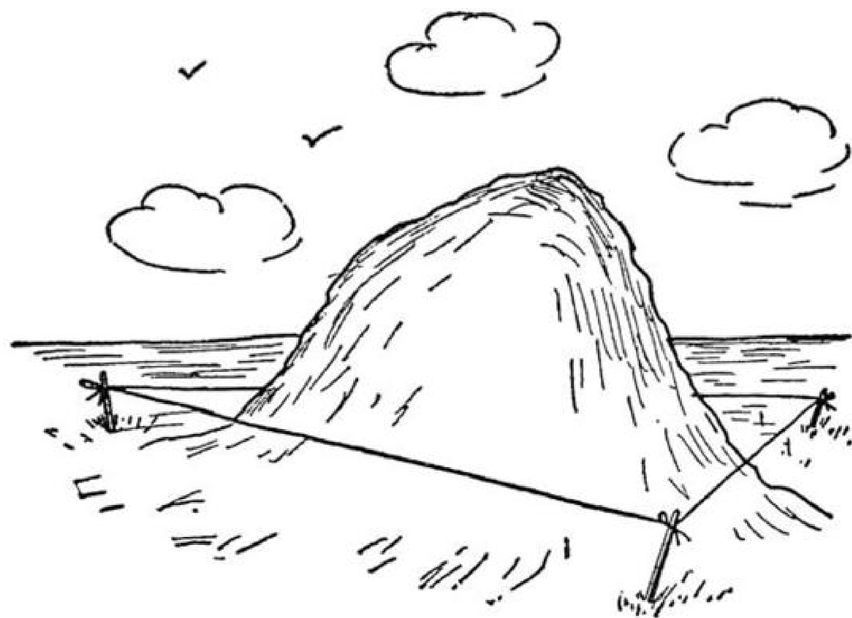


图 40a

然而，这并不意味着爱因斯坦就是错的——大质量物体不会弯曲周围的空间。这可能仅仅因为，即使是喜马拉雅山脉，其弯曲周围空间的程度也无法用我们最精密的仪器测量出来。还记得伽利略在尝试用带遮光板的灯测量光速时遭遇的失败吧！（图31）

因此，不必灰心，你可以用更大质量的物体做尝试，例如太阳。

啊哈，这下就成功了！如果你在地球和两颗恒星之间连上绳子，将太阳围在三角形之中，你就会发现这个大三角形的内角和显然不等于180°。当然你没有这么长的绳子，不过你可以用一束光代替，其效果也很好，因为光学告诉我们，光总是走最短的路径。

图40b示意了用光线来测量角度的实验。位于太阳盘面两端（观测时的位置）的恒星S_I和S_{II}的两束光汇聚在经纬仪中，这样就可以测出它们的夹角。稍后，等太阳移开这片区域时再重复一次实验，重新测量两颗星的夹角。如果前后两次测量出的夹角不同，我们就可以证明，太阳的质量的确弯曲了其周围的空间，使光线从它们原来的路径偏转。这个实验最早由爱因斯坦提出，用来检验他自己的理论。读者可以通过图41中的二维类比来更好地理解这个实验。

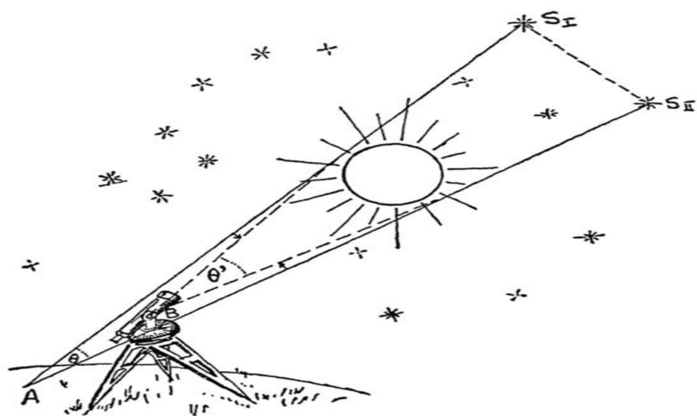


图 40b

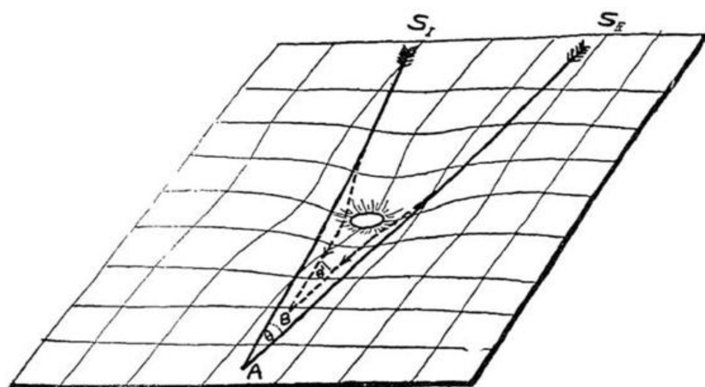


图 41

显然，在正常情况下进行爱因斯坦的实验有一个实际障碍：太阳的

光线太强，你无法看到它旁边的星星。不过在发生日全食的时候，这些星星就清晰可见了。基于这一想法，1919年，一支英国天文远征队在普林西比群岛（西非，今属圣多美和普林西比共和国）观测日全食时[14]，完成了这个实验，这也是那一年发生的最适合观测的日全食。在有太阳和没有太阳时，两颗星的角度差是1.61″±0.30″，而爱因斯坦的理论预言的是1.75″。在后续的多次观测中，也获得了相似的结果。

诚然，1.5″的角度差并不大，但这足以证明，太阳的质量确实能导致周围的空间发生弯曲。

或者，除了太阳以外，我们还可以用更大质量的恒星做测量，这样得到的三角形的内角和，与180°就会相差几分，甚至是几度。

作为内部观测者，想要理解弯曲的三维空间的概念需要一些时间和想象力，但只要想明白了，你就会发现，它和其他的经典几何概念一样清晰明朗。

现在，为了完全理解爱因斯坦的弯曲空间理论及其与万有引力的根本问题之间的关系，我们只需要再迈进一步。首先我们必须记住，刚才探讨的三维空间只是承载了一切物理现象的四维时空的一部分，因而，空间弯曲只不过反映了四维时空中更普遍的弯曲，而表示光和物体运动的四维世界线，在超空间中也势必要看作曲线。

从这一观点出发，爱因斯坦得到了惊人的结论，即引力现象只不过是四维时空世界弯曲所产生的效应。实际上，我们现在可以摒弃“行星直接受到太阳的作用力而以圆形轨道围绕其运行”这一不合时宜的陈旧观点了。[15]更准确的描述是：太阳的质量弯曲了其周围的时空，而行星的世界线之所以如图30中所示的样子，只是因为这是它们在弯曲空间中前进的测地线。

因此，“引力是一种独立的力”这一概念彻底从我们的头脑中消失了，取而代之的是：纯粹几何空间中的所有物体，在因大质量物体的存在而造成的弯曲空间中，都沿着“直线”或者说测地线运动。

4.闭合和开放空间

在简要讨论爱因斯坦的时空几何学中的另一个重要问题之前，我们还不能结束本章：有限和无限宇宙的佯谬。

至此，我们已经讨论了大质量物体对邻近空间造成的局部弯曲现象，也就是宇宙这张“大脸”上分散的一系列“空间粉刺”。但是，除了这些局部的变化外，宇宙这张“大脸”本身，究竟是平坦的还是弯曲的呢？

图42给出了二维的带有“粉刺”的平坦空间，与两种可能的弯曲空间的图示。所谓的“正弯曲”的空间，对应的是球面或其他的闭合几何面，它们无论朝向哪个方向，都是以“相同方式”弯曲的。反之，“负弯曲”空间则会在一个方向上向上弯曲，而在另一个方向上向下弯曲，就像马鞍。如果你在足球和马鞍上分别裁取两块皮革，尝试将它们摊平在桌子上，你就能清晰地认识到这两种弯曲的区别。你会注意到，两种皮革在不拉伸或不压皱的情况下，都无法摊平，不同的是，来自足球的那块皮革边缘必须要拉伸才能铺平，而来自马鞍的那块皮革则需要压皱——如果将来自足球的那块皮革中间摊平，那么其边缘就会缺少皮料；而来自马鞍的那块皮革的边缘却总是有多余皮料，所以必须将其压皱。

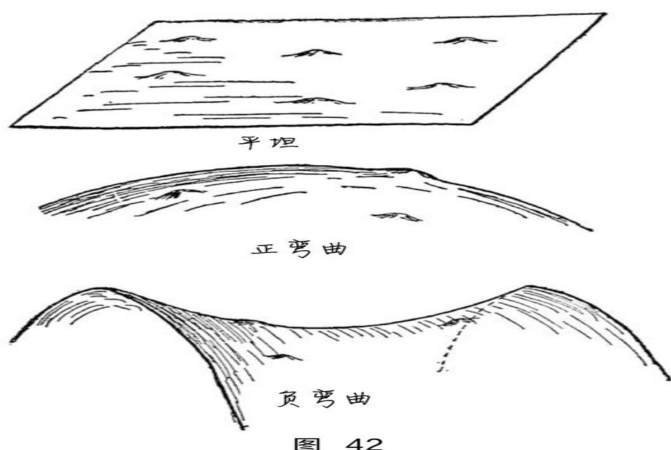


图 42

我们还可以换一种方法陈述这个观点。假设我们从某一点开始，分别数出周围1英寸、2英寸、3英寸等范围内的“粉刺”数量（沿着表面数），我们会发现，平面上的粉刺的数量与距离的平方成正比，如1、4、9等；球面上粉刺的数量的增长则会慢于平面；而“马鞍”面上粉刺数

量的增长则比平面更快。因此，尽管居住在表面上的二维阴影科学家没法从外部观察出其所在的表面的形状，但还是能通过落在不同半径的范围内的粉刺数量来测出曲率。这里还需要注意的是，正弯曲和负弯曲的区别，还能通过测量其对应的三角形内角和来体现。如前文所言，球面上的三角形的内角和总是大于180°，而如果你在马鞍面上画一个三角形，你会发现，它的内角和总是小于180°。

上述讨论曲面的结论可以推广到三维空间的弯曲，我们会得到这样一张表：

[illegible]度

[illegible]的立方

（类似球面）

[illegible]立方

（类似平面）

[illegible]立方

（类似马鞍）

这张表可以用来解答“我们居住的空间是有限的还是无限的？”这一问题——这个问题我们将在第十章中，介绍宇宙的尺寸时进行探讨。

[1]　西式正餐中，饭前饮用开胃酒，饭后食用点心，因而这两件事之间隔了一段时间（译注）。

[2]　约书亚是《旧约圣经》中的人物。约书亚（Joshua）是继摩西之后的另一位以色列人领袖，带领以色列人离开旷野进入应许之地，也就是迦南美地。在他的领导下，以色列人在许多战争中获得了辉煌的胜利，占领了以色列地区一带的土地。耶利哥城是约旦古城，在约旦高地以南。据圣经记载，攻打耶利哥城时，约书亚得到耶和华的帮助，列队吹号绕城七圈，城墙就自行倒塌，约书亚带领军队入城，杀光了城内所有人（译注）。

[3]　光波的振动方向与前进方向相垂直，被称为横波。只有固体中才有横波产生，而液体和气体中的粒子振动方向只能与前进方向一致。

[4]　火漆的这种性质不满足流体的黏性定律，被称为非牛顿流体。火漆这样的非牛顿流体的特征是“遇强则强”，在受到强剪切力的情况下变得类似固体而易碎，而在受力较小的情况下又具有较强的流动性（译注）。

[5]　参见第122~123页。

[6]　实际上，设两个码头之间的距离为l，记住顺流的速度是v+V，逆流的速度是v-V，可以得到整个行程的耗时：

$$t=\frac{l}{v+V}+\frac{l}{v-V}=\frac{2vl}{(v+V)(v-V)}=\frac{2vl}{v^2-V^2}=\frac{2l}{v}\times\frac{l}{1-\frac{V^2}{v^2}}。$$

[7]　这种收缩以第一个提出它的物理学家斐兹-杰惹命名，即认为这是纯粹的机械运动产生的效应。

[8]　当然这只是理论上的图景。如果真有两艘高速运行的火箭飞船相遇了，任意一艘飞船上的乘客都不会看到另一艘飞船——就如同你看不到步枪射出的子弹一样，何况子弹的速度还只是飞船速度的零头。

[9]　或者如果你愿意，也可以理解成因为在四维空间中，毕达哥拉斯公式相对时间来说是扭曲的。

[10]　“五分钟蛋”是鸡蛋最有益人体营养吸收的煮法（译注）。

[11]　天狼星是地球上观测除了太阳以外最明亮的恒星，距离太阳系8.6光年。天狼星的伴星天狼星B是人类发现的第二颗白矮星，也是距离太阳系最近的白矮星。但除此以外，人类目前没有在天狼星与其伴星周围发现其他的任何星体（译注）。

[12]　直接实验：相对模拟实验而言的概念。可以在实际环境中，在研究对象上直接完成的实验就叫作直接实验（译注）。

[13]　大圆是指穿过球心的平面在球面上截出的圆。赤道和子午圈就是这样的大圆。

[14] 这支远征队由英国著名天体物理学家爱丁顿爵士（Sir Arthur Stanley Eddington）带队，是第一次验证了广义相对论的尝试。爱丁顿是爱因斯坦以及他的相对论理论的坚定支持者，曾写作多篇文章解读和支持。除此之外，爱丁顿在恒星物理方面有诸多重要的研究成果，如爱丁顿极限、恒星核聚变机制（参见最后一部分）等。他们观测的日全食发生在1919年5月29日，全食带跨越南美和非洲，全食时长6分50秒，是自1416年以来全食时间最长的日全食，因而非常适合观测。爱丁顿前往的普林西比群岛是这次日全食的极大值位置附近。这次日食与2009年7月22日著名的“长江大日食”同属沙罗周期136，都是全食时间很长的日食（译注）。

[15] 经典力学的说法现在仍在中学物理中呈现，原因是对于大多数不从事物理工作的人来说，用经典力学来理解行星运动是最容易的。而且对于当今已经发展得较为完备的经典力学来说，行星运动也是很基础且很有用的物理知识。因而文中所谓的“摒弃”一说，只是为了让大家更好地认识四维时空观对于一切物理现象的普遍解释，译者认为，从经典力学理解行星运动还是有必要的，但是在看过这本书之后，读者也一定要记得相对性原理和四维时空观对物理世界的诠释（译注）。

第三部分：微观世界

第六章 下降的阶梯

1.古希腊人的想法

在分析各种物体的性质时，从熟悉的“普通大小”的物体开始是个好想法，然后一步步深入它的内部结构，直到人眼看不到的物质性质的终极起源。所以，我们就从晚餐桌上的一碗蛤蜊浓汤开始吧。

我们之所以选择蛤蜊浓汤，倒不是因为它口感鲜美，营养丰富，而是因为它是所谓的非均相混合物[1]的好例子，你甚至不需要借助显微镜就能看出，它是由一大堆不同的成分混杂而成的：蛤蜊片、洋葱瓣、番茄块、芹菜段、土豆丁、胡椒粒、肥肉末，还有咸的汤底。

我们在日常生活中见到的大部分物质，尤其是有机物，都是非均相的混合态，尽管我们往往需要显微镜才能认清这一真相。例如牛奶，即使是在小的放大倍率下你也能看到，它是由均匀的白色液体和悬浮于其中的小滴奶油组成的乳状液。

在显微镜下，普通的花园土壤是由石灰石、黏土、石英、铁的氧化物、其他矿物质及盐，还有各种动植物腐烂后产生的有机物质组成的上好的混合物。如果我们打磨一块普通的花岗岩表面，就能立刻发现这块石头是由三种不同的晶体（石英、长石和云母）紧密结合而组成的固体。

在我们对物质的内部结构的研究之路上，混合物质的组成仅仅是第一步，或者说，是下降的阶梯中最高的一级台阶，紧接着我们可以对组成这些混合物的每一种均匀成分展开直接研究。

对于真正的均匀物质，如一段铜线、一杯水、充满房间的空气（当然，要除去悬浮于其中的灰尘），即使借助显微镜，我们也看不出其中有不同的组成部分，组成它们的物质看似是贯穿始终的。这倒不假，不

论是铜线还是任何其他的固体，情况都一样（玻璃这样的非结晶体除外），它们在高倍显微镜下总是呈现出所谓的微晶结构。但是我们可以看到，在均匀物质中，单个晶体都表现出相同的本质——铜线中的铜晶体，铝锅中的铝晶体等——正如我们在一把食盐中只能找到氯化钠晶体一样。通过使用特殊技术（慢结晶），我们可以增大盐、铜、铝或其他任意均匀物质的晶体到任意体积，而一块这样的“单晶”物质，就像水或者玻璃一样均匀。

我们是否可以通过肉眼或者使用最优良的显微镜进行观察，证明我们所说的这些均匀物质，无论在多大的放大倍率下看上去都是一样的呢？换句话说，我们是否能相信，即使是极少量的铜、盐和水，与更大的样本量相比，它们的性质也永远保持相同，且可以被持续不断地分割成更小的部分呢？

第一个提出并尝试解答这个问题的，是大约二十三个世纪之前居住在雅典的古希腊哲学家德谟克利特（Democritus）。他的答案是否定的，他更倾向于相信，无论物质看上去有多么均匀，也一定是由很大数量（不过他并不知晓具体有多大）的分散开的微小粒子（他也不知道这种粒子有多小）组成的，他将这种粒子称为“原子”或“不可分割者”。这些原子，或者说不可分割者，在不同物质中的数量是不同的，但它们在性质上的区别只是表象，而非事实。实际上，火焰原子和水原子是相同的东西，只是表现形式不同。所有物质都是由同样的、永恒不变的原子构成的。

与德谟克利特同时代的恩培多克勒（Empedocles）则持有不同的观点。他认为，原子的种类各不相同，它们按照不同的比例混合，形成了现今已知的各种物质。

基于当时尚处萌芽阶段的化学知识，恩培多克勒提出有4种原子，分别对应当时已知的4种基本元素：土、水、气和火。

根据恩培多克勒的观点，土壤就是由紧密混合的土原子和水原子组成的，混合得越好，土壤也就越好；从土壤中生长出的植物包含土原子和水原子以及来自太阳射线的火原子，这些共同组合成复杂的木头分子；在燃烧干柴的过程中，水元素消失，这可以视作木头分子的瓦解，

其中的火原子在火焰中散去，而土原子则是残存的灰烬。

在科学仍处于婴儿阶段的当时，这一关于植物生长和柴火燃烧的解释看似十分符合逻辑，但现在我们知道，这实际上是错的。我们知道，植物成长所用的大部分物质并不像古人所想，或者在不明真相的情况下大多数人所想的那样，来自土壤，而是来自空气。土壤本身，除了作为水的储备库支持植物生长以外，只向植物提供了极少量的所需的盐分，而若想培养出一大株玉米，其实只需要很小的一块土壤就可以了。

真相是，支持植物成长的主要来源是空气，主要由氮和氧混合而成（不像古人所想的那样是单一元素），也包含了一定量的二氧化碳，这种分子由氧原子和碳原子组成。在阳光的作用下，植物的绿叶吸收空气中的二氧化碳，与根部吸收的水相反应，产生组成植物体的各种有机物质，同时产生的氧气会部分返还到大气中，这也是“房间中的植物能清新空气”的原因。

朽木燃烧时，其中的木头分子与空气中的氧气再度结合，重新变为二氧化碳和水蒸气，在炽焰中消散。

古人相信是“火原子”进入了组成植物的物质结构中，但实际上并非如此。阳光提供的只有能量，这一能量使得二氧化碳分子破裂，因而生长中的植物可以在大气中摄取食物。正因为火原子并不存在，所以显然，火焰并不是火原子“逃脱”形成的，而仅仅是因为被加热的气体流显现了出来，同时伴随着能量的释放。

现在请让我们考虑另一个例子，这个例子同样也描绘了类似的古人和现代人对化学变化的不同观念。

你自然知道各种金属是由对应的矿石在高温熔炉中煅烧得到的，但第一眼看去，大多数矿石与普通的岩石并无二致，因此，古代科学家会认为矿石和其他岩石一样都是由同一种成分组成的，这也就不令人稀奇了。当然当他们把一块铁矿石放进烈火中炙烤时，他们会发现得到的是完全不同于普通岩石的东西——这是一种可以制作锋利的刀刃和矛头的坚硬而闪亮的物质。用最简单的方式解释这个现象就是，这种金属是岩石和火相结合而形成的——换句话说，土原子和火原子结合成金属分

子。

为了将这一解释应用到所有金属，他们将不同金属，如铁、铜和金的不同性质，说成是由于土原子和火原子组成比例的不同。闪闪发光的黄金难道不是比黯淡无光的黑铁要含有更多的火吗？

但如果是这样，为什么不再给铁加上点火，或者直接往铜里加上点火，将它们变为宝贵的黄金呢？于是，中世纪的那些实用心态的炼金术士耗费了大量的青春，在烟雾缭绕的火炉旁尝试制造“人造黄金”。

从他们的观点来看，他们的工作就和当今的化学家研发生产人造橡胶的方法一样，他们的理论和实践之所以不切实际，在于他们认为金和其他金属不是单质，而是复合物。不过反过来说，如果不经过尝试，谁又能知道哪种物质是单质，哪种是复合物呢？难道不正是因为早期的化学家无数次将铁、铜变为金银的徒劳尝试，我们才明白“金属是化学元素单质，而含有金属的矿石是金属原子与氧原子的结合”的吗（现代化学家称之为金属氧化物）？

铁矿石在鼓风炉的熊熊烈火中变为金属铁的过程，并非古代炼金术士所想的原子的结合（土原子和火原子），恰恰相反，是原子分离的结果，也就是金属氧化物中氧原子的去除。在潮湿的空气中，铁器表面生成的锈也不是铁分子中火原子逃离后残留的土原子，而是铁原子和空气中或水中的氧原子结合，生成铁的氧化物这种复合分子的结果。[2]

从以上讨论中可以明显得到，古代科学家对于物质内部结构和化学变化本质的观念基本正确，问题只在于他们对基础元素是由何组成的错误概念。

其实恩培多克勒列举出的4种元素都不是真正的元素：空气是多种气体的混合物；水分子是由氢原子和氧原子构成的；岩石的组成极其复杂，涉及各种元素；而火原子根本不存在。[3]

事实上自然界中存在的元素不只有4种，而是92种，也就是说，有92种不同的原子[4]。这92种元素中，其中氧、碳、铁和硅（大部分岩

石的主要成分）在地球上的含量巨大，我们也颇为熟悉，其他的则相对稀少。你可能从未听过诸如镨（praseodymium，Pr）、镝（dysprosium，Dy）、镧（lanthanum，La）这样的元素。除在自然界中可以获得的元素以外，现代科学还成功实现了人工制造全新的化学元素，我们将在稍后谈到它们。其中的一种名为钚（plutonium，Pu）的元素，无论是战争用途还是和平用途，它在产生原子能的过程中都扮演着重要角色。以不同的比例去组合这92种基本元素的原子，我们可以得到无限种复杂的化学物质，如清水和茶水、黄油和石油、木头和骨头、草药和炸药，还有三苯基氯化嘧啶和甲基异丙基环己烷——这些优秀的化学家都已烂熟于心，但大多数人甚至连一口气读出来都难以做到的物质。而如今，有关这些无穷尽的原子组合的列表、它们的化学性质的总结以及制备它们的方法手册，正在一卷卷地问世。

2.原子有多大？

当德谟克利特和恩培多克勒提出原子的存在时，他们是基于一个模糊的哲学观念，即万物不能永无止境地分割成越来越小的部分，它们总会达到一个再也无法分割的基本单元。

而当一位现代化学家谈及原子时，他所指的对象就更加明确了。因为有关元素原子，以及由它们组合而成的复杂分子的准确知识，对于理解化学的基本定律是至关重要的，根据这个定律，不同的化学元素只能按重量以明确的比例相结合，这个比例必须明确反映出这种物质的每个独立的原子的相对重量。例如，化学家总结出，氧原子、铝原子和铁原子的重量必须分别是氢原子的16、27和56倍。然而，尽管不同化学元素的相对原子质量已经是至关重要的基础化学信息，但以克计量的原子的实际质量，对于化学工作而言是无关紧要的，并不会影响任何的化学现象，也不会影响化学定律和化学方法的应用。

但是，当物理学家谈及原子时，他最先考虑的问题自然是：“原子的真实尺寸用厘米表示是多少？质量用克表示是多少？在给出的一块物质中包含了多少单独的原子或分子？有没有什么方法能观察、计数和操纵

单个的原子和分子呢？”

能够估计出原子和分子的尺寸的方法有很多，其中最简单的一种德谟克利特和恩培多克勒在不借助现代实验室设备的情况下就能实现。如果组成任何物体的最小单元，例如一段铜线，是一个原子，那么就不可能让铜线变得比这种原子还要薄。因此我们尝试拉伸这段铜线，直至其变为一连串的单个原子，或者我们可以用锤子敲打它，直至它变成一片只有一个原子厚度的铜薄片。然而，无论是铜线还是其他的物质，都难以进行这种操作，因为在期望的最小厚度达到之前，物体就会不可避免地破裂开。但液体物质，如水面上的一层薄油膜，就可以轻易延展成只由一层分子组成的单层薄膜，即在水平方向上，一层“单个”分子相互连接，而在垂直方向上则没有分子堆叠。如果你有足够的细心和耐心，完全可以自己完成这一实验，从而简单地测量出油分子的尺寸。

取一个浅而长的容器（图43），将它放在绝对水平的桌面或地面上，向其中加水直到没过边缘，然后横放一条线，使其接触水面。在线的一侧滴一小滴某种纯油，油就会扩散至整个水面。如果你顺着边缘移动这条线，远离油膜，油膜会继续扩散，顺着线变得越来越薄，而它的厚度将最终等于单个油分子的直径。如果进一步移动这条线，油面的连续性将被破坏，油层将被扯出一个一个的洞。只要知道你在水面上滴了多少油以及油面在破裂之前能扩散到的最大面积，你就能轻易算出单个油分子的直径。

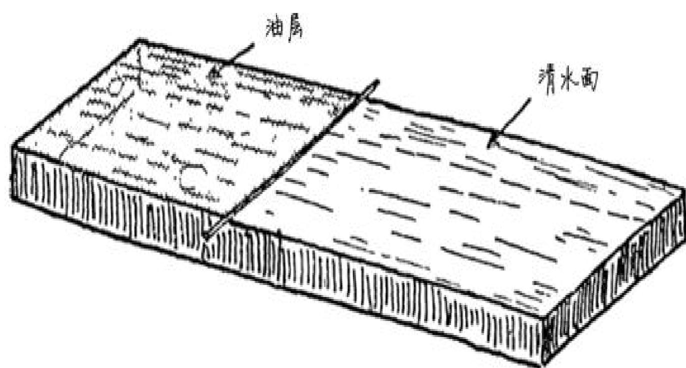


图 43

当拉扯过度时，水面上的油膜会破裂。

在进行这个实验时，你还能观察到另一有趣的现象。当你将油滴在清水面上时，你起先会注意到油面上泛起的熟悉的虹彩，就如你经常在船只往来的港口的水面上见到的一样。

众所周知，这种虹彩是光在油层的上下界面反射后互相干涉形成的现象，之所以会产生不同的颜色，是因为油滴下后刚开始扩散时，油面不同位置的厚度不同。如果你多等一会儿，等油膜均匀铺开，整个油面最终会呈现出统一的颜色。随着油膜愈加稀薄，油面的颜色也会逐渐开始从红色变为黄色，再变为绿色、蓝色、紫色，也就是色光的波长会逐渐减小。如果继续延展油面，颜色会最终完全消失。但这并不意味着油层本身不存在了，而只是因为它的厚度已经小到比波长最短的可见光还小，其颜色已经超出我们的可视范围了。但你仍可以将油膜和清水层区分开，因为从薄层上下表面反射的光会互相干涉，导致总光强下降。因此，即便油面的颜色消失了，我们还是能将其和水面区分开，因为油面的反光看上去会更“昏暗”一些。

实际进行这项实验时，你会发现1立方毫米的油大约能覆盖1平方米的水面——如果再进一步拉伸油面的话，就会导致水面的露出。[5]

3.分子束

另一项探寻物质的分子结构的有趣方法可以通过研究气体和蒸汽在透过小口流向真空来实现。

假设我们有一个真空的大玻璃泡（图44），其中置有一个在一侧开了个小孔的陶土圆筒，外面缠绕上用于加热的电阻线制成的小电炉。如果我们在电炉里放上一些低熔点的金属，如钠和钾，圆筒中就会充满金属蒸气，进而通过侧壁上的小孔流向周围的空间。

金属蒸气在与玻璃泡的冷内壁接触后，便会附着在上面，形成一层薄的镜面状的沉积，这可以清楚地告诉我们物质逸出电炉之后的流向。

除此之外，随着电炉温度的变化，我们看到的内壁上薄层的分布也

会有所不同。当电炉温度很高时，产生的金属蒸气的密度也会相当高，看上去就像从茶壶或者蒸汽机中喷出的蒸汽一样。这时的金属蒸气从小孔流出后，会向各个方向扩散（图44a），充满整个玻璃泡，并基本均匀地沉积在内壁上。

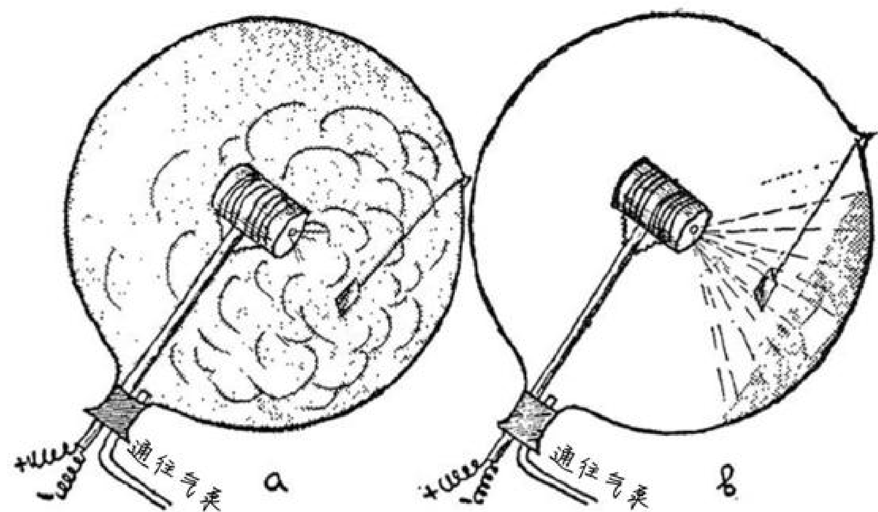


图 44

而当电炉温度较低时，电炉中的金属蒸气密度也会较低，这时整个过程将完全不同。从小孔流出的金属蒸气不会向所有方向扩散，而是近乎沿直线运动，其中的大部分会沉积在朝向电炉开口那一侧的内壁上。可以在开口前放一小块物体，从而凸显这一事实（图44b）——放置的物体后面的内壁上不会形成沉积，而这块没有沉积的区域的形状与遮挡物的形状完全一致。

只要记得蒸汽是由大量分离的分子组成的，它们会沿各个方向运动，并持续地相互碰撞，那么就能很容易理解气体在高密度和低密度状况下的不同流动表现。金属蒸气密度较高时，从小孔中流出的气流就如同从失火的剧院的出口蜂拥而出的大股人流一样，在穿过门后，他们会在大街上四散而去，这时候还会互相碰撞。反之，当金属蒸气密度较小时，就像一个个走出门的人一样，他们会走直路，不会受到干扰。

这种从电炉的小孔中流出的低密度物质流被称为“分子束”，是由于大量紧挨在一起的分离的分子一同飞跃空间而形成的。这样的分子束在研究分子的独立性质时是极其有用的，例如，科学家可以用它来测量热运动的速度。

奥托·斯特恩（Otto Stern）最早制造出研究分子束运动速度的设备，他的设备和菲佐测量光速时所用的仪器基本相同（参见图31），由两个同轴的齿轮组成，只有当齿轮以特定的速度旋转时，分子束才能顺利通过（图45）。

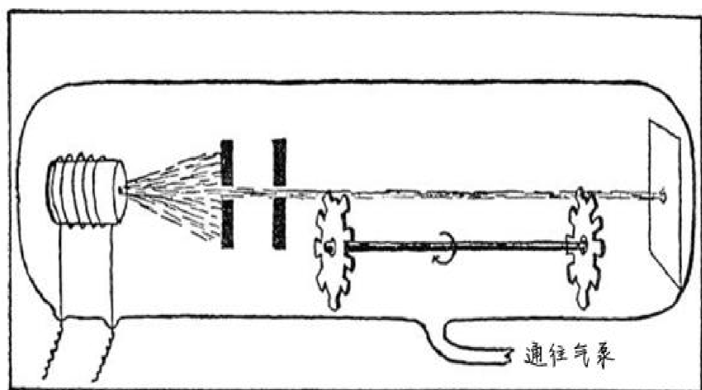


图 45

斯特恩用一块隔板截获细薄的分子束。利用这一设备，斯特恩发现分子运动的速度一般是极高的（钠原子在200℃的温度下速度是1.5千米/秒），并且会随着温度上升而提高。这直接证明了热动力学理论，即物体温度的上升仅仅是因为其中分子无规律热运动的加快。

4.原子照相

尽管上述例子不容置疑地证明了原子假说的正确性，但终究还是“眼见为实”来得更好，因此，最终确定原子和分子存在的决定性证据，是直接用肉眼看到这些微小单元。这种视觉展示在不久之前，已经由英国物理学家布莱格（William Lawrence Bragg）利用他发明的给晶体内的原子和分子照相的方法实现了。

不过，不要贸然认为给原子照相是件容易的事，因为要给如此之小的物体拍照，除非照明用的光线的波长比被摄物体更小，不然照片会无可救药地模糊。你总不能用刷墙的粉刷去画波斯细密画吧！

与微小的微生物打过交道的生物学家更加明白这种困难，因为细菌的大小（大约0.000 1厘米）与可见光的波长相近。为增加图像的清晰度，他们使用紫外线给细菌进行显微照相，这样才获得较好的结果。然而分子的尺寸以及它们在晶体中的距离是如此之小（0.000 000 01厘米），无论是可见光还是紫外线都无法描绘出它们的准确身形。为了看到单独的分子，我们必须使用波长小于可见光1/1 000的射线——或者说，我们必须使用所谓的X射线。

但此时我们又遭遇到了看似无法逾越的困难：X射线可以穿过物体而不发生折射，因此无论是透镜还是显微镜，在使用X射线时都不会起作用。X射线的这一性质，以及其强大的穿透能力，在医学中自然是很有用的，因为穿透人体时产生的折射会使得X射线图像完全模糊。但这个性质似乎完全排除了使用X射线来放大图像的可能！

起初这一情形令人感到无望，但布莱格想出了一个解决问题的天才办法。他基于阿贝（Abbé）提出的显微镜的数学理论来考虑，也就是显微镜图像可以被视作大量分离图案的叠加，每个图案由视场内成一定角度的平行暗条来表示。上述表述的简单例子可以参考图46，在暗场中心的明亮的椭圆形区域，是由四幅单独的暗带系统叠加而成的。

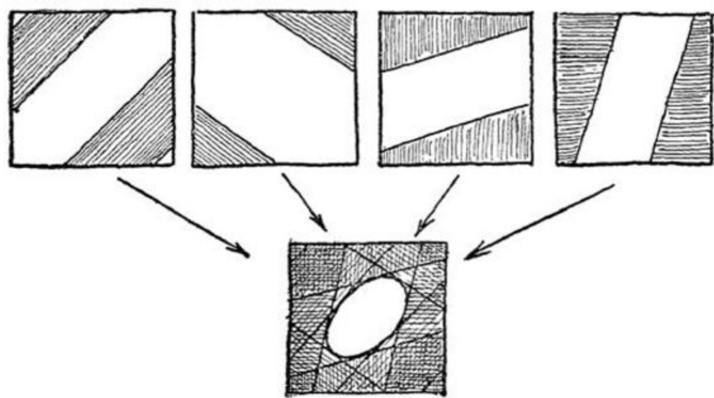


图 46

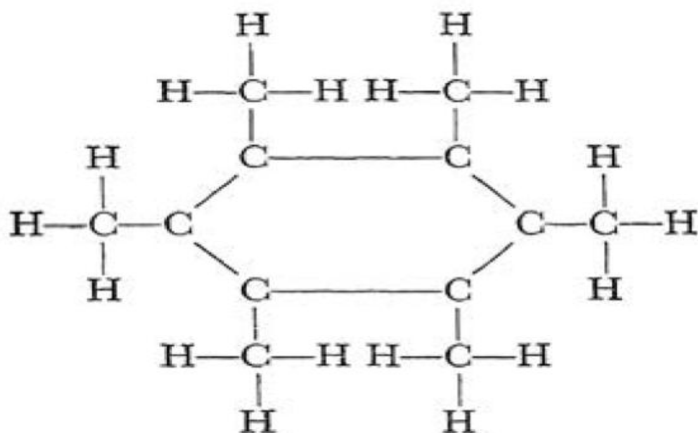
根据阿贝的理论，显微镜的运作包括：（1）将原始图像分割为大量单独的条带图案；（2）放大每个图案；（3）再次叠加图案，以获得放大的图像。

这个过程可以和利用一系列单色板印制彩色图片的方法相类比。单看每块单色板，你可能说不出整张图片是什么，而当它们以恰当的方式相互叠加之后，整张图片便清晰明了了。

能自动完成上述三个步骤的X射线透镜是无法制造的，因此我们必须一步步进行：从不同方向拍摄大量晶体的X射线条带图案，随后以恰当的方式在一张照相纸上将其叠加。至此我们就能实现用“X射线透镜”放大图像的目的了，只不过真正的透镜可以在瞬间完成这件事，而我们的这一过程却需要一位经验丰富的实验员操作几个小时。因此，布莱格的方法只能拍摄晶体的照片，因为其分子都不会移动，而液体和气体分子则会四处乱窜。

尽管布莱格的方法不能像按一次快门那么简单就能得到照片，但利用这一方法获得的合成照片已经足够完美和准确了。如果是因为技术原因而不能用一张底片就拍下整座大教堂的照片的话，没人会反对多拍几张然后进行合成吧！

在附录图版I中我们看到了一张熟悉的六甲苯的X射线照片，由此化学家写出其分子式：



从图像上可以清晰地看到6个碳原子形成环，同时分别连接着另外6个碳原子，而更轻的氢原子则几乎难以看到。

即使是最多疑的人，在亲眼看到此照片之后，也会同意这是分子和原子存在的确凿证据吧。

5.解剖原子

德谟克利特给这种微小粒子起名为原子，它在古希腊语中意为“不可分割之物”，他的意思是：这些粒子是对物质进行分割的最终界限。换言之，原子是组成一切物体的最小、最简单的结构单位。几千年后，“原子”的原初哲学思想已经转变为准确的科学语言，它已经被大量的经验证据所证实，变成了有血有肉的实体。同时，“原子是不可分割的”这一想法仍被大家所认同，人们依旧假想，不同元素的原子具有不同的性质，是因为各个原子的几何形状不同，例如，氢原子被视作一个球体，钠原子和钾原子则被视作长椭球体。

而氧原子，在当时则被想象成一个甜甜圈的形状，中心有一个几乎完全闭合的洞眼，而水分子（H_2O）正是通过将两个球形的氢原子放置在氧原子两侧的洞眼上形成的（图47）。至于钠和钾能更好地置换出水里的氢这一现象，则被解释为：钠原子和钾原子的长椭球形状相比氢原子的球形更容易填充进氧原子的甜甜圈洞眼里。

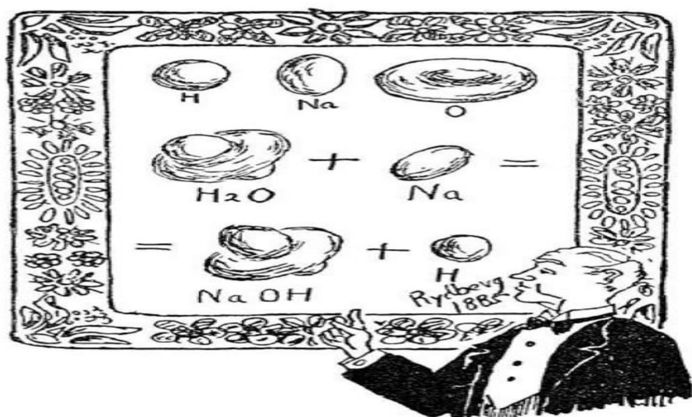


图 47

根据这些观点，各个元素释放的光学光谱的不同，可以归因于不同形状原子的振动频率不同。考虑到这一点，物理学家曾尝试用实验测得的各元素的光谱频率来确定不同原子的形状，就像在声学中通过音色来辨别小提琴、乐钟和萨克斯一样，但并未获得成功。

事实上，所有基于原子的几何形状来解释原子的化学和物理性质的尝试，都没能取得重大进展。而真正使科学家踏出认识原子性质的第一步的，是他们最终意识到，原子并不仅仅是几何形状不同的简单物体，恰恰相反，它们是由大量独立的运动部件以复杂的机制组合而成的。

“在原子精细的身体上切开第一刀”这一殊荣属于英国著名物理学家汤姆逊（Joseph John Thomson），他指出，各种化学元素的原子都包含有带正电荷和负电荷的部分，这两部分靠电场力的吸引相结合。汤姆逊设想，原子是由大体上均匀分布的正电荷体和大量漂浮在其中的负电荷微粒构成的（图48）。[6]汤姆逊将负电荷微粒称为电子，其电量之和与总正电荷相等，因此原子整体是呈电中性的。根据他的假设，因为原子对电子的束缚力并不是很强，所以电子中的一个或多个可以被移去，留下一个带正电的原子残留物，称为正离子；反之，如果原子成功获取了来自外界的额外电子，则会带负电，称为负离子；原子得到或失去电子的过程称为电离。

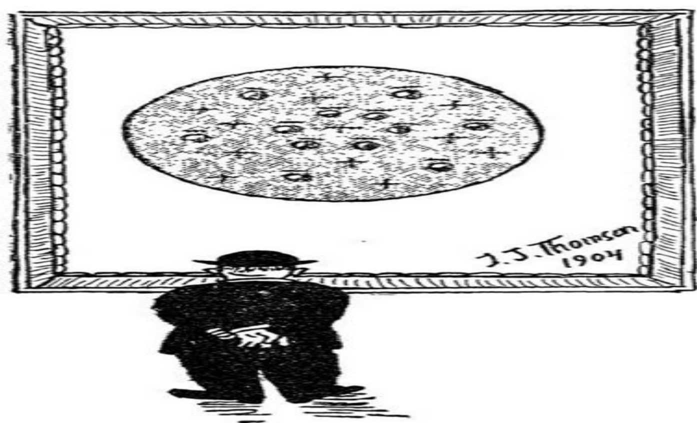


图 48

汤姆逊的观点是基于法拉第（Michael Faraday）的经典实验，后者证明出了无论原子带有多大的电荷，它的电量一定是5.77×10^{-10}静电单位的整倍数。在此基础上汤姆逊又迈出了一大步，他发明了从原子中

获取电子的方法，并研究了自由电子束在空间中高速飞行的现象，由此认为这些电荷的本质是单独的粒子。

汤姆逊关于自由电子束的研究的一个极为重要的结果，是估计出了它们的质量。他从带有强电场的某种物体（如热电炉丝）中抽出一束电子，使其从一对相对放置的电极板之间通过（图49）。

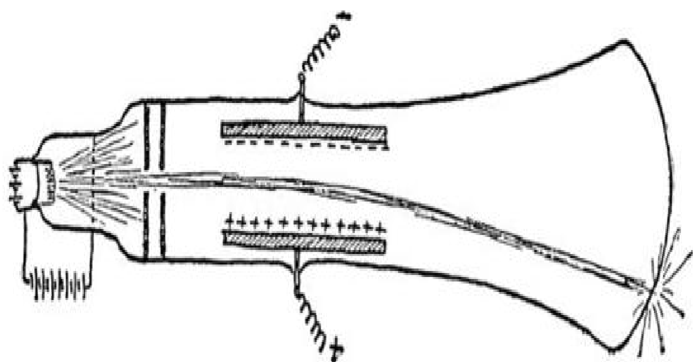


图 49

因为电子带有负电，更准确来说，它本身就是负电体，所以电子束会被正极板吸引，被负极板排斥。汤姆逊在电极板的尽头放置了一块荧光屏，这样就能轻松地看到电子束的偏转。只要知道电子的电量、偏转距离和对应的电场强度，他就能估计出电子的质量了——实际上，电子的质量的确很小。汤姆逊发现，一个电子的质量为一个氢原子质量的1/1 840，这表明，原子的绝大多数质量集中在带正电的部分。

尽管汤姆逊对原子中带负电的电子流的认识是完全正确的，但他对均匀分布在原子内部的正电部分的认识却与实际情况相差甚远。1911年，卢瑟福（Rutherford）证明原子的正电部分，同时也是原子的绝大部分质量，集中在原子极为中央的一块很小的核区域内。他通过一个研究所谓的“α粒子在穿过物体时是否会发生散射”的实验，得到了这一结论。α粒子是特定的不稳定重元素（如铀和镭）释放的微小的高速粒子，因为它们的质量被证明与原子相近，同时带有正电，由此推断它们必定是原来的原子中带有正电部分的碎片。当一个α粒子穿过靶材料的原子时，它会受到原子中电子的吸引力以及原子中正电部分的排斥力的影响。然而，一方面，电子的质量太轻，它们对入射的α粒子的影响不

会比一群蚊子对一头大象的影响大；另一方面，入射的带正电的α粒子在极为靠近占原子主要质量的正电部分时，必定会受到排斥而偏转，散射向各个方向。

因而在研究α粒子束穿透薄铝箔时的散射情况时，卢瑟福得到了一个令人咋舌的结论。为了能解释观察到的结果，他必须假设产生散射的α粒子与原子的正电部分之间的距离小于原子直径的千分之一。显然，对此唯一的解释只可能是：α粒子和原子的正电部分的尺寸都约为原子本身尺寸的千分之一。

卢瑟福的发现将原来汤姆逊的“正电部分大面积分布”的原子模型大幅收缩，变成在原子极为中心的位置上只存在一个微小的原子核，而负电的电子群在它的外面，而不是像汤姆逊的模型那样，电子如同西瓜中的瓜子一般散布。卢瑟福的模型如同一个微缩的太阳系，原子核是太阳，电子是行星（图50）。

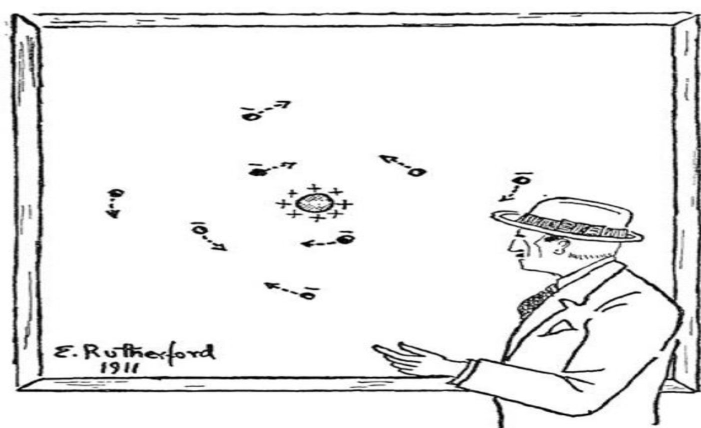


图 50

除结构外，原子同行星系的相似性还在于：原子核占原子总质量的99.97%，而太阳质量占太阳系总质量的99.87%；电子之间的距离与电子直径之比，与行星之间的距离和行星直径之比的数量级（几千倍）也相当。

更重要的是，原子核与电子之间相互吸引的电场力，与太阳和行星间的引力一样，都遵循着平方反比定律[7]。这使得电子在原子核周围描绘出圆形或椭圆的轨道，正如太阳系中行星和彗星的运行轨迹。

根据上述的这些关于原子内部结构的观点，不同化学元素的原子之间的差异，必然缘于围绕原子核旋转的电子数目的不同。既然原子整体是呈电中性的，那么围绕原子核旋转的电子的数目，必定取决于原子核所携带的正电荷的数目，这一数值可以通过观察α粒子在与原子核相互作用后的散射来直接估计。卢瑟福发现，将化学元素按照重量递增排列，所得到的序列中，电子的数目也在连续增加：氢原子有1个电子，氦原子有2个，锂原子有3个，铍原子有4个……直到自然界中存在的最重的元素——铀，总共有92个电子。[8]

这一代表原子特点的数字也通常被称为有关元素的原子序数，同时也与化学家排列的指示元素化学性质的表中，各元素所占的位置号码相同。

因此，任一给定元素的物理性质和化学性质都可以用围绕其原子核旋转的电子的数目来表示。

19世纪末，俄国化学家门捷列夫（D. Mendeleev）注意到，在元素的天然序列中，元素的化学性质呈现显著的周期性规律。

他发现，在相隔一定数目之后，元素会复现相近的化学性质。图51显示了这种周期律，已知的所有元素都排列在围绕圆柱的螺旋形条带上，每一列元素的化学性质都相近。

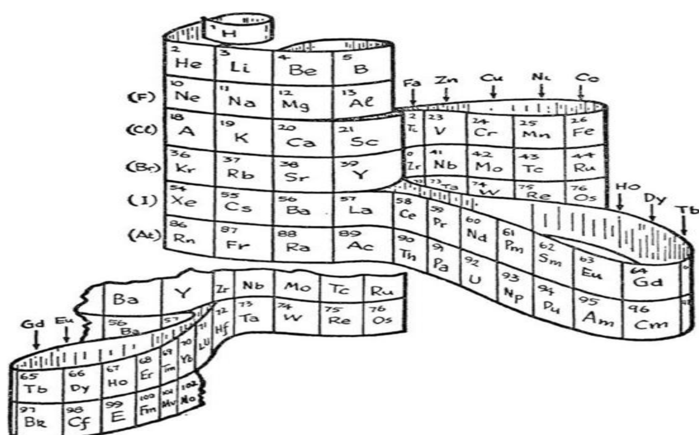


图 51

正视图。

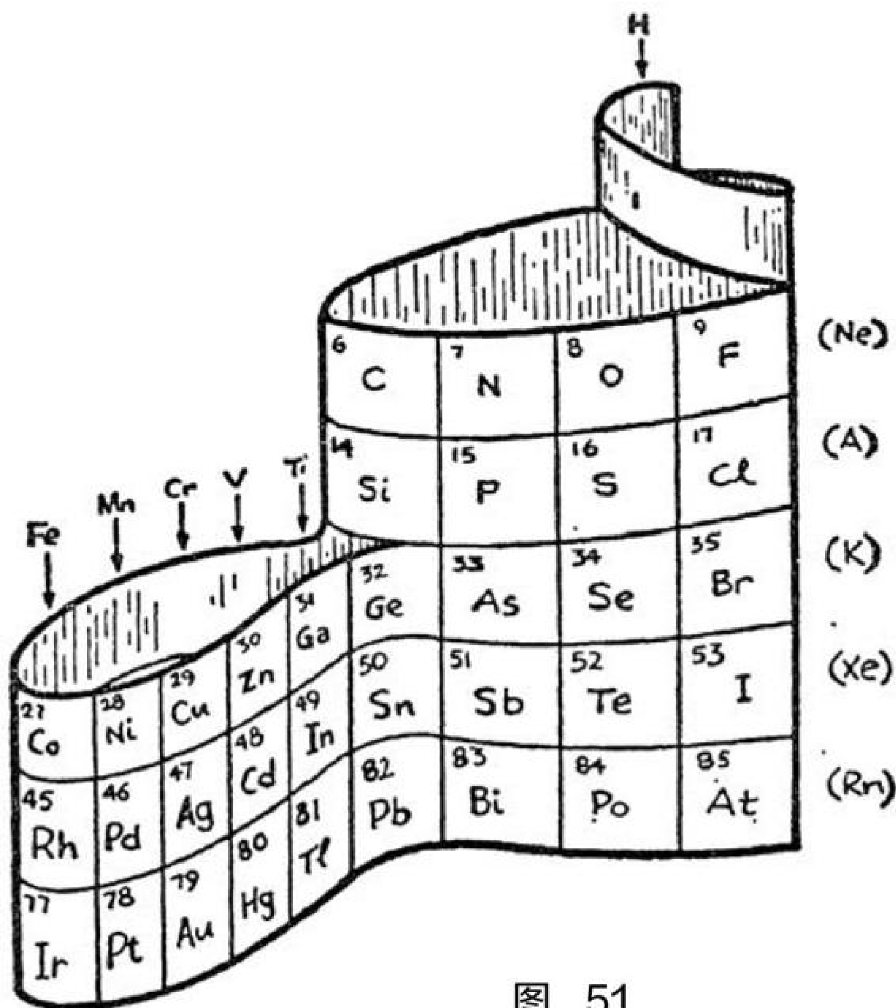


图 51

后视图。

元素周期表呈现在弯曲的条带上，其中2、8和18为元素性质的重复周期。前一页中的下侧图，显示了从常规的周期律中脱离的另一组元素（稀土元素和锕系元素）。

我们看到，第一周期只有两个元素：氢和氦，随后的两个周期各包含8个元素，再往后的周期是每18个元素一重复。如果你还记得，沿元素序列每走一步，原子中的电子就会多一个，那么我们就不得不总结出，我们所观察到的化学性质的周期性规律，必然与某种稳定的电子排

列方式，或者说“电子层”的重复出现有关。第一个完整的电子层包含两个电子，往下的两层分别包含8个电子，再往后分别是18个。

我们还注意到，在图51中的第六周期和第七周期中，本应严格遵循规律的周期化学性质被两组元素（所谓的稀土元素和锕系元素[9]）扰乱了，必须将它们置于另外的位置。这一异常缘于，在这些元素中，我们遭遇了电子层结构的内部重建，这破坏了原子的化学性质。

如今，有了原子结构图，我们就能试着去解答，究竟是何种结合力将不同元素的原子相连，从而组合成无穷无尽的复杂化合物分子了。例如，为何钠原子和氯原子能紧密结合成食盐分子？

图52向我们展示了这两种原子的电子层结构，其中，氯原子的第三层缺少一个电子，而钠原子的第二层多出了一个电子。因此钠原子中多余的电子就倾向于去往氯原子，从而填满其缺失的外层。如此电子转移的结果就是，钠原子带上了正电（失去了一个负电子），而氯原子带上了负电。在电场力的吸引下，两个带电的原子（准确来说是离子）会相互附着，进而形成氯化钠分子，通俗点说，就是形成了食盐分子。

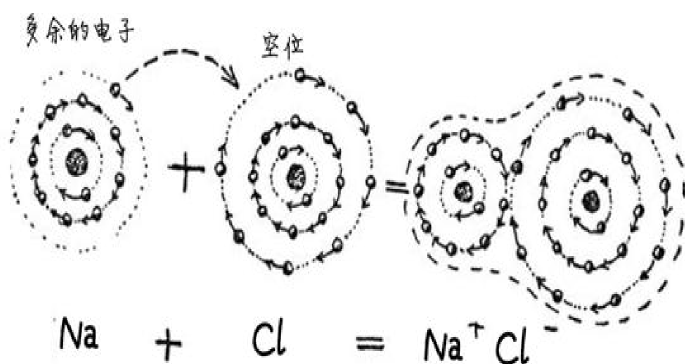


图 52

钠原子和氯原子结合成氯化钠分子的示意图。

同样的原理，最外层缺少两个电子的氧原子会“绑走”两个氢原子仅有的两个电子，最终形成水分子（H_2O）。反言之，氧原子和氯原子，

或者氢原子和钠原子之间，就不会有相互结合的趋势，因为前者中的两种原子都想从外界索取电子，而不会给出，后者中的两种原子则恰好相反。

每一层的电子数量都刚好的原子，如氦、氩、氖和氙，是完全自给自足的类型，既不会获取电子也不会给出电子，它们倾向于保持高贵的孤立姿态，因而拥有这一特点的元素（所谓的“稀有气体”）在化学上呈现出惰性。

我们在结束有关原子和它的电子层的内容时，还需要讨论一下，在被称作“金属”的一类物质中电子所起到的重要作用。金属物质与其他物质的区别在于，它们最外层的电子层受到原子的束缚较弱，会经常失去一个电子。因此金属内部充满了大量的自由电子，如同一群无家可归的人一样四处乱窜。当我们给一段金属丝的两端通上电时，自由电子会顺着电场力的方向移动，因而产生所谓的电流。

自由电子的存在也是金属拥有良好的导热性的原因——不过我们会在稍后的章节中讨论这一点。

6.微观力学和不确定性原理

我们在上一节中看到，在原子中，电子围绕着原子核旋转的系统类似于太阳系，因此人们自然会猜想电子的运动是否会和已经明确建立起来的、支配着太阳周围行星运动的天文学定律一致。尤其是电场力和引力的相似性——两者的吸引力都与距离的平方成反比，是否表明，电子也一定是沿着椭圆轨道围绕着原子核运行，而原子核则位于一个焦点上（图53a）？

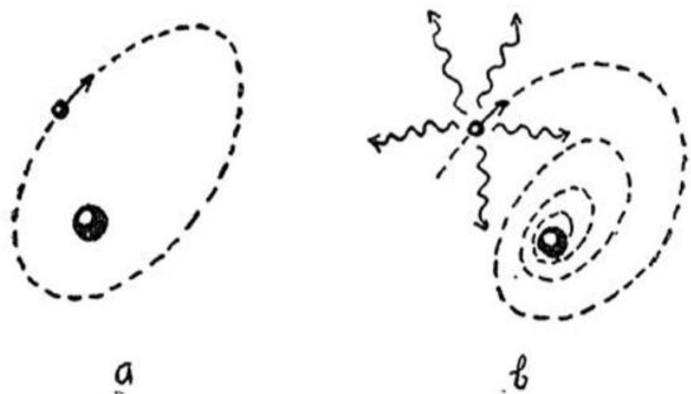


图 53

然而，一切以行星系统的运行为蓝本给电子的运行方式建立稳定图景的尝试，都出乎意料地失败了，以至于有一段时间人们竟认为，要么是物理学家疯了，要么就是物理学本身就是荒唐的。

问题的根源在于，与太阳系中的行星不同，电子本身是带电的，对于任何振动的或旋转的电荷而言，只要围绕着原子核做圆周运动，就一定会产生强烈的电磁辐射。随之而来的是能量的衰减，随着辐射被带走，按照逻辑，其结果必然是电子沿着螺旋轨迹（图53b）向原子核下坠，直到旋转的动能全部耗尽，撞到原子核表面。至于这一过程所需的时间，根据已知的电子电量和旋转频率，可以轻易算出，电子耗尽能量直至坠落所需的时间，不会超过百分之一毫秒。

因此，直到不久之前，物理学家还在用他们所知道的最新的知识坚定地说，原子结构的行星系统模型不会存在哪怕万亿分之一秒的时间，它们刚刚形成就会立刻坍缩毁灭。

然而，纵然物理理论做出的预言令人沮丧，实验结果却显示，原子系统是相当稳定的，电子总是好端端地在原子核周围愉快地打转，既不丧失能量，也没有坍缩的趋势！

这怎么可能！为何曾经准确无误的力学定律，在应用于电子运行时，就与通过观察得到的事实大相径庭了呢？

为解答这个问题我们必须要回到科学的最基本的问题上：什么是“科学”？科学的本质到底是什么？大自然的“科学解释”的含义又是什么？

举一个简单的例子，古希腊人认为地球是平坦的，你不能责怪他们有这样的想法，因为如果你走上一片开阔的陆地，或者航船横穿大洋，你也会自认为这一理论是真的，除了偶尔出现的山峦和群峰，地球的表面看上去确实是平的。古人的错误不在于“从特定的观察点去看，地球确实是平的”，而是在于将这一表述外推到能够达到的观察极限之外。况且，事实上，只要远远超越这个常规的极限去观察，例如研究月食中投射在月球表面的地影的形状，或者通过著名的麦哲伦环球航行，就能立刻证明这种外推是错误的。

如今我们说地球看上去是平的，是因为我们能看到的只是整个球面中极小的一片区域。与之类似的，我们在第五章中讨论过，宇宙空间可以是弯曲而有限的，尽管它看上去平坦且无限，但那只是因为观测者的视角是受限的。

可是，这些讨论和我们在研究组成原子的电子的力学表现时所遭遇的矛盾有关系吗？答案是肯定的。在这些研究中，我们已经暗自假定，电子运动的机制和巨大的天体的运行，或者是我们在日常生活中很熟悉的“正常物体”的运动，都遵循完全一致的规律，因而可以用同一种术语来表达。

事实上，我们熟知的力学定律和概念是凭借经验建立在我们对周遭物体的研究之上的，同样的定律在之后还可以用于解释更大的物体，例如行星和恒星的运动。而天体力学的成功，使得我们可以精确计算千万年前后的各种天文现象，这无疑更加证实了传统力学定律外推去解释更大质量的天体运动的可行性。

可是谁又能保证，同样的力学定律，足以解释巨大天体的运动以及火炮炮弹、钟摆、玩具陀螺的运动的力学定律，就一定也能应用于电子——这种体积和质量都比人造最微小的机械装置的万亿分之一还要小的粒子——的运动呢？

当然，预先假设常规的力学定律在解释原子的微小组成部分的运动时必定失败，是毫无根据的，但换个角度来看，如果真的失败了，我们也不该太过惊讶。

因此，原本是天文学家用于解释太阳系中行星运动的定律，被拿来试图解释原子中电子的运动，难免会得到似是而非的结论。此时首先应该考虑的，是经典力学定律在解释如此微小的粒子时，是否需要做出根本性的调整。

经典力学的基本概念是用轨迹描述运动的粒子以及这些粒子在轨迹上的运动速度。任何运动的粒子在特定时刻都会占据一个确定的空间位置，把这些位置连起来就形成一条连续的线，称为轨迹，这是显而易见的，也是描绘所有运动物体的基本概念。给定的物体在不同时刻的位置间的距离，除以对应的时间间隔，得到的就是速度。从位置和速度两个概念出发，整个经典力学的体系就建立起来了。直到最近，还未曾有科学家遭遇用这些最基本的概念去描述运动现象时出现错误的情况，而哲学家也习惯性地将其作为“先验”来考虑。

然而，在尝试将经典力学定律应用于描述微小的原子系统内的运动时，科学家遭遇的惨败表明，有些东西从根本上就错了，进一步扩展就是，经典力学基于的最基本的思想是“错的”。“运动物体的连续轨迹”和“任一时刻的准确速度”这两个基本的概念，应用到原子内微小部分的运动时未免太粗糙了。简单来说，事实证明，如果想要把我们熟知的经典力学，外推到极其微小的质量上，我们就需要对它进行大幅度的改造。但如果经典力学的旧概念真的不能应用到原子世界上的话，那么说明它在反映更大物体的运动情况时，也不是绝对正确的。

因此我们得出结论，经典力学背后的原理只能看作是无限接近于“真实情况”，而这种近似如果应用到超出原先适用范围的更精细的系统上，就会彻底失效。

对原子系统的力学表现的研究，和所谓的量子物理的创建，为科学奠定了新的基础。量子物理的建立，是出于“两种不同物体之间的相互作用存在一定的下限”这一发现，它破坏了关于物体运动轨迹的经典定义。事实上，如果一个物体能按照精确的数学轨迹运动的表述，就暗示了通过某种特定的物理仪器就能记录下这一轨迹的可能。但不要忘记，无论是对于哪种运动物体，记录其运动轨迹意味着，我们会不可避免地干扰其原有的运动。

事实上，如果运动物体对记录其在空间中的连续位置的仪器产生作用，那么根据牛顿第三定律，仪器也会对物体产生反作用。如果我们能像经典物理中假想的那样，可以按要求尽可能地减少两个物体（此处指运动物体和记录位置的仪器）间的相互作用，那么我们就能造出一台理想的仪器，它足够灵敏，在记录下运动物体的连续位置的同时，又不会打扰到它的运动。

物理相互作用的下限这一存在，近乎彻底地改变了我们的前提，因为我们无法将记录仪器对运动造成的干扰减小到任意数值。因此，由于观察造成的对物体运动的干扰变成了运动本身不可分割的一部分，而我们也不再是用无限细的数学曲线来描述物体的运动轨迹，而是被迫使用一条具有一定厚度的扩散条带。经典物理中尖细的数学轨迹线，变成了新生力学眼中宽阔的扩散带。

不过，物理相互作用的最小量，通常称为作用量子（quantum of fiction），却是一个非常小的数值，只有在我们研究非常微小的物体的运动时才会起到重要作用。举个例子，尽管左轮手枪子弹的轨迹确实不是一条清晰的数学曲线，但这条轨迹的“粗细”还是要比组成子弹的单个原子的尺寸小得多，故而可以视其厚度为零。

但是，在研究更轻、更易受到测量的干扰的物体时，我们发现它们轨迹的“厚度”变得越来越重要。对于围绕原子核旋转的电子，它的轨道厚度已经接近于它的直径，因而，电子运动的轨迹不能再用图53中的曲线来表示，而是应该像图54中那样。此时粒子的运动不能用熟悉的经典力学的术语来表示，它的位置和速度都具有一定的不确定性[海森堡的（Heisenberg）不确定性关系和玻尔（Bohr）的互补原理]。[10]

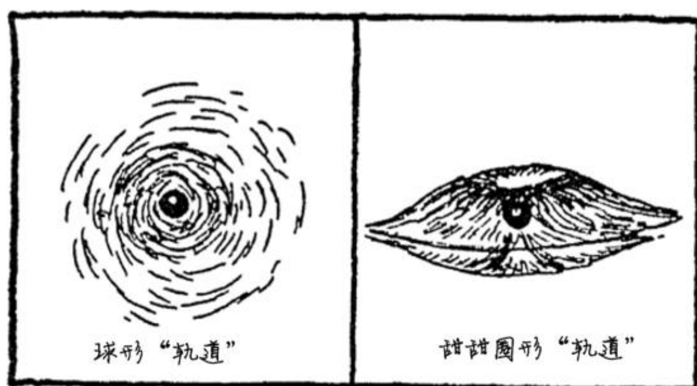


图 54

原子中的电子运动的微观力学图像。

新物理学的这项惊人的发现，将我们非常熟悉的运动粒子的轨迹、准确位置和速度的概念统统扔进了废纸篓里，几乎什么都不剩。如果我们不能继续使用这些曾经被普遍接受的基本原理来研究电子的话，我们又能基于什么去理解它们的运动呢？究竟应该用什么数学公式去取代经典力学的方法，才能兼顾位置、速度、能量的不确定性以及量子物理所求的事实呢？

我们可以通过研究古典光学理论领域的类似情况来求得这个问题的答案。我们知道，日常生活中看到的大多数的光学现象，都可以用光沿直线传播的假设来解释，因而我们才将光称之为光线。不透明物体投射下的影子形状、平面镜和曲面镜的成像、透镜和各种更加复杂的光学系统的工作原理，都可以通过光线反射和折射的基本定律来轻而易举地解释（图55a，55b，55c）。

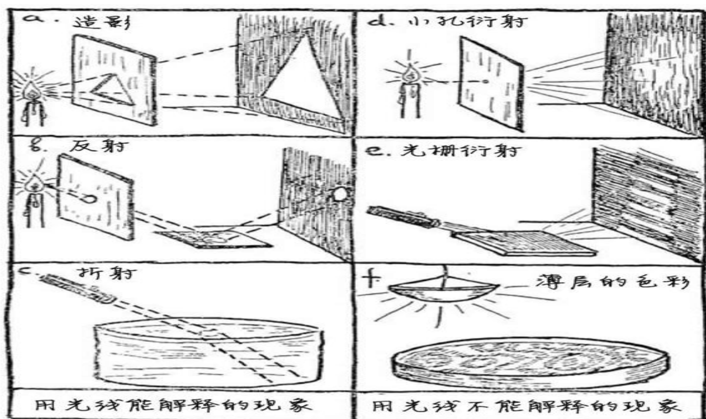


图 55

但我们也知道，尝试用几何光学的方法，也就是用光线来解释光的传播的经典理论，在描述光学系统中“透光孔的尺寸与光的波长相仿”的情况时就毫无作用了。此时发生的现象被称为衍射，它完全超出了几何光学的范畴。

因此，当一束光穿过非常小的开口（大约0.000 1厘米）时，将不再以直线传播，而是分散成折扇状的图样（图55d）。当一束光照向一块刻有大量平行窄线的镜面（“衍射光栅”）时，它不会按照熟悉的反射定律运动，而是会被反射向不同的方向，具体方向与刻线间的距离以及入射光的波长有关（图55e）。此外，散开在水面的油膜反射的光也会形成一系列特定的明暗条纹（图55f）。

在上述例子中，我们熟悉的“光线”的概念彻底失去了描述我们观察到的现象的能力，因此，我们必须用光能在光学系统的整个空间中的连续分布来替代它。

可以很容易看出，光线的概念在应用于衍射现象时的失败，与力学轨迹的概念在应用于量子物理中的现象时的失败，是极为相似的。正如我们不能制造出一束无限细的光束一样，量子力学原理也不允许无限细的运动粒子的轨迹存在。在这两个情况中，我们都必须放弃“某种东西（光或粒子）沿着特定的数学曲线（光线或力学轨迹）传播”这一描述，而不得不将其修改为：我们观察到的现象，是“某种东西”持续分布在整个空间中的结果。在光学中，这里的“某种东西”是光在各个点上的振动强度；而在力学中，这里的“某种东西”就是新近引入的位置的不确定性

这一概念。运动粒子在某一时间点被发现时的位置，不再是某个确定的点，而是几个可能的位置中的任一个。我们再也不能说运动粒子在某一时间点位于某个精确的位置了，只能根据“不确定性关系”的计算式来求得位置的可能范围。

用来解释光的衍射现象的波动光学，与用来解释力学中粒子运动的新兴“微观力学”，或者说“波动力学”〔由德布罗意（ L. de Broglie ） 和薛定谔（Schroedinger）提出〕之间存在一定的联系，我们可以通过实验轻易看出这一联系。

图56向我们展示了斯特恩用于研究原子衍射的仪器。一束由本章前面说明过的方法所产生的钠原子射向晶体表面并被反射回来。此处晶格表面的规则原子层充当了衍射光栅的作用。入射的钠原子从晶体表面反射，被一系列摆向不同角度的小瓶子收集，每个瓶子收集到的原子的数量都会经过精细的测算。图56中的点画线表示了结果。我们看到，与一般的物体反射是朝向一个确定的方向（例如玩具枪发射的小球在金属片上反弹）不同，钠原子在一个确定的角度上分散开，形成了与普通的X射线衍射极其接近的图案。

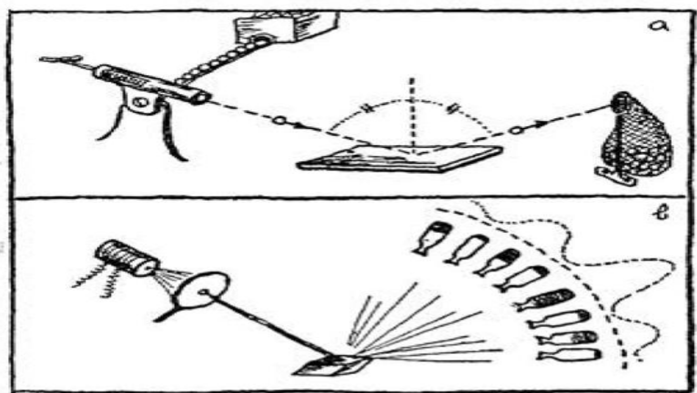


图 56

a. 用轨迹的概念能解释的现象（小球在金属片上的反弹）。

b. 用轨迹的概念不能解释的现象（钠原子在晶体上的反射）。

这类实验无法通过经典力学的基本内容——即单个原子的运动是沿着确定的路径这一描述——来解释，却完美适用于新的微观力学的观

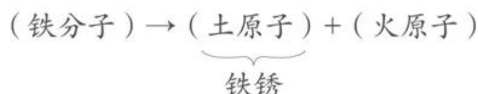
点，正如光波的传播适用于现代光学一样。

[1] 非均相混合物：由具有不同物理性质的分散相和连续相所组成的物系称为非均相物系或非均相混合物（译注）。

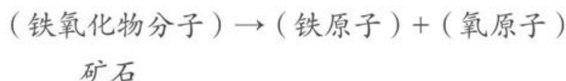
[2] 炼金术士会将处理铁矿石的过程表示为如下公式：



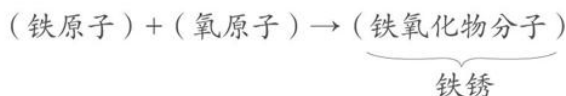
铁的生锈则是：



如今我们这么写：



和



[3] 我们将在本章的稍后部分看到，在光量子理论的提出中，火原子的概念将有一部分会再次焕发新生。

[4] 截至2020年，人类已经发现（或成功合成）118种不同的化学元素，其中有94种可以在自然界中找到。另外，原文的“92种原子”的说法并不准确，因为同一种元素也有不同的同位素。不过下文中有更详细的讨论，故此处不多谈（译注）。

[5] 那么，油膜在破裂之前能稀薄到什么程度呢？为简便计算，设想一个1立方毫米油的立方体，边长均为1毫米。为了将这1立方毫米的油拉伸到超过1平方米的面积上，接触水面的1平方毫米油面必须增大1 000倍（1平方毫米到1平方米）。因此原立方体在垂直方向上必须缩小至 $\frac{1}{1\,000\times 1\,000}$=10-6，以保持总体积不变。这是油膜的厚度限制，我们也因此得到了油分子的实际大小，大约是

$0.1\text{cm}\times 10-6=10-7\text{cm}$。因为一个油分子包括许多原子，所以原子的尺寸应当更小。

[6]　现在我们通常将汤姆逊的原子模型称为枣糕模型或葡萄干面包模型，也叫西瓜模型，下文中有提到（译注）。

[7]　即物体间相互作用力的大小与距离的平方成反比。

[8]　如今我们已经真正了解了炼金术的技艺（参见后文），因而我们可以人工制造更为复杂的原子了。例如在原子弹中发挥作用的人造元素钚，其电子数是94。

[9]　我们现在将这两组元素称为镧系元素和锕系元素，而之前所称的稀土元素现在不完全对应镧系，因为在主表中有的元素也被划入了稀土的范畴（译注）。

[10]　有关不确定性关系的更详细的探讨可以在作者的另一本书《汤普金斯先生神游仙境》（Mr. Tompkins in Wonderland，纽约麦克米兰公司，1940年出版）中找到。

第七章 现代炼金术

1.基本粒子

我们已经知道，各种化学元素的原子具有相当复杂的力学系统，大量电子围绕着中心的原子核旋转。那么我们难免会问出这样的问题：原子核是不是绝对不可分割的物质结构单元呢？还是说它们还能被分割成更小、更简单的部分？这92种不同的原子类型有没有可能被削减为几种非常简单的粒子呢？

早在19世纪中叶，这种简化分类的愿望就驱使英国化学家威廉·普劳特（William Prout）提出了一个假说：所有化学元素的原子都具有相同的本质，即氢原子在不同程度上的“聚合”。普劳特的假说，是基于“通常情况下，利用化学方法测得的元素的原子质量，基本上是氢原子质量的整数倍”这一事实提出的。因此，根据普劳特的说法，氧原子的原子量是氢原子的16倍，所以它一定是16个氢原子团聚在了一起；原子量为127的碘原子肯定是由127个氢原子组成的。[1]

但在当时，化学上的发现并不能支持这个大胆的假说。对原子量的精确测定显示，大部分情况下它们并不是准确的整数倍，而只是非常接近整数，少数情况下甚至根本与整数倍相差很远（例如氯原子的原子量是35.5）。这些事实似乎与普劳特的假说直接相悖，所以当时没有得到广泛的认同，直到普劳特去世，他都不知道自己实际上有多么接近事实。

直到1919年，英国物理学家阿斯顿（Aston）才让这个假说再度重见天日，他发现普通的氯实际上是两种不同的氯原子的混合物，它们的化学性质相同，却有着不同的整数原子量——35和37。化学家测定的非整数35.5只是二者混合后的值。[2]

对多种化学元素的深入研究揭示了一个令人震惊的事实：大部分元素都是化学性质相同而原子量不同的几种成分的混合物。这些“成分”被称为同位素，也就是元素周期表中占据同一位置的不同物质。[3]不同同

位素的质量依旧是氢原子的整数倍这一事实，让普劳特的假说焕发新生。因为前一章中说到，原子的主要质量集中在原子核，因而普劳特的假说可以用现代语言改写成：不同种类的原子核是由不同数量的氢原子核组成的。因为它们在物质结构中扮演的角色，它们得到了“质子”的特称。

但是上述论述还需要一个重要的纠正。以氧原子核为例。因为氧是元素自然序列中的第八个，那么它一定带有8个电子，相应地，它的原子核也一定带有8个正电荷，而氧原子是氢原子的16倍重。因此，如果我们假设氧原子是由8个质子构成的，那么它的带电量是正确的，但质量是错的（都是8）；如果假设是16个，那么质量是对的，带电量却是错的（都是16）。

显然，摆脱困境的唯一出路是，假设组成复杂原子核的一部分质子丢失了它原有的正电荷，呈电中性。

这种失去电荷的质子，或者，我们现在称其为“中子”，早在1920年就已经由卢瑟福提出，但在12年后才在实验中被发现。必须说明的是，质子和中子不能被视为两种截然不同的粒子，它们是同一种基础粒子的两种不同电性，如今我们称之为“核子”。事实上，我们知道质子能通过失去正电荷变为中子，中子也能得到正电荷变为质子。[4]

中子作为原子核结构单元的引入消除了前文讨论的困难。为了能理解氧原子核的质量是16个单位而带电量只有8个单位这件事，我们必须接受它是由8个质子和8个中子组成的事实。碘原子的原子量是127，原子序数是53，包含53个质子和74个中子，而重元素铀的原子核（原子量238，原子序数92），是由92个质子和146个中子组成的。[5]

由此，在几乎一个世纪之后，普劳特的大胆假说才收获了应得的荣誉，而且我们现在可以说，已知的无限种类的物质全部都是由两种基本粒子进行不同组合的结果：（1）核子，物质的基本粒子，可以是电中性的，也可能带有一个正电荷；（2）电子，带负电荷的自由粒子（图57）。

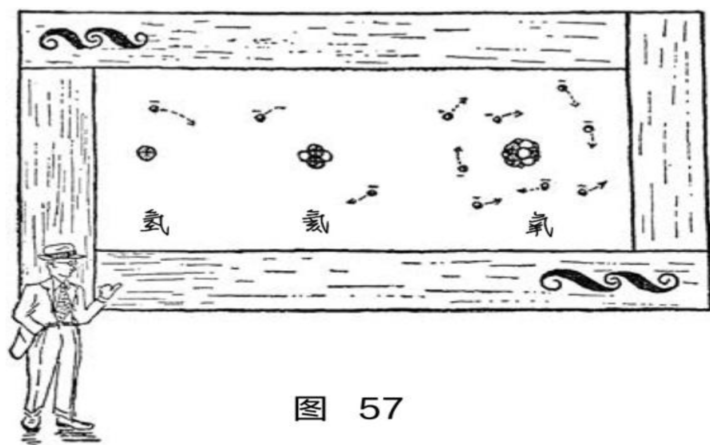


图 57

下面有几道来自“万物烹饪全书”的食谱，展现了宇宙厨房是如何用装满橱柜的核子和电子做出每道菜的：

水。准备大量氧原子，每个由8个中性核子、8个带电核子以及围绕原子核的8个电子组成；准备两倍数量的氢原子——用一个电子搭配上一个带电核子就可以了；在一个氧原子上加上两个氢原子，将得到的水分子混合均匀，装入大玻璃杯内，放至冷却，即可上桌。

食盐。准备钠原子，由12个中性核子、11个带电核子以及11个电子组成；准备相同数量的氯原子，由18或20个中性核子、17个带电核子（同位素）以及17个电子组成；将钠原子和氯原子摆放成三维棋盘的图案，从而得到食盐晶体。

TNT（三硝基甲苯）。准备碳原子，由6个中性核子、6个带电核子以及6个电子组成；准备氮原子，由7个中性核子、7个带电核子以及7个电子组成；依照前面的食谱准备氧原子和氢原子（参见“水”）；将6个碳原子连成环，第7个碳原子接在环外；在碳环的3个原子上各连接一个氮原子，每个氮原子上再各连接一对氧原子；在环外的碳原子上连接3个氢原子，在环中剩下的两个碳原子上也各连接一个氢原子；得到的分子排列起来，形成大量的小块晶体，再将这些晶体压实。切记谨慎操作，因为这个结构不稳定，极易爆炸。

尽管我们已经看到，中子、质子和带负电的电子已经足够构成我们所需的一切物质，但这份基本粒子表单似乎尚不完整。事实上，如果普

通电子是带负电的自由粒子，那么为什么不能有带正电的自由粒子，或者说正电子呢？

同样，如果作为物质的基本单元的中子能带上正电荷变为质子的话，为什么不能带上负电而变成负质子呢？

实际上，在自然界中确实存在正电子，它与普通的负电子极为相似，只是电性相反。至于负质子，也有存在的可能性，只是实验物理尚未成功探测到它们。[6]

正电子和负质子（如果有的话）在我们的物理世界中的数量远少于负电子和正质子的原因是，这两组粒子是相互敌对的。众所周知，两种电荷——正电荷和负电荷，在相遇时会互相抵消，因此，既然两种电子表示的只是正电荷和负电荷，那么我们就不能指望让它们共处一室。事实上，当两种电子相遇时，它们的电性便会立刻抵消，且不再是两种独立的粒子。在这两个电子相互湮灭的过程中，强烈的电磁辐射（伽马射线）会从它们的相遇点释放，携带着两个粒子消失前的能量。

根据物理的基本定律，能量既不能凭空创造也不能凭空消失，所以此时我们见证的，只是自由粒子的静电能向辐射波的电动能的转化。波恩（Born） 教授将正电子和负电子相遇的现象描述为“狂野的婚姻”[7]，布朗（Brown）教授的说法更加恐怖，他将之称为两个电子的“结伴自杀”[8]。图58a显示了这种遭遇的情形。

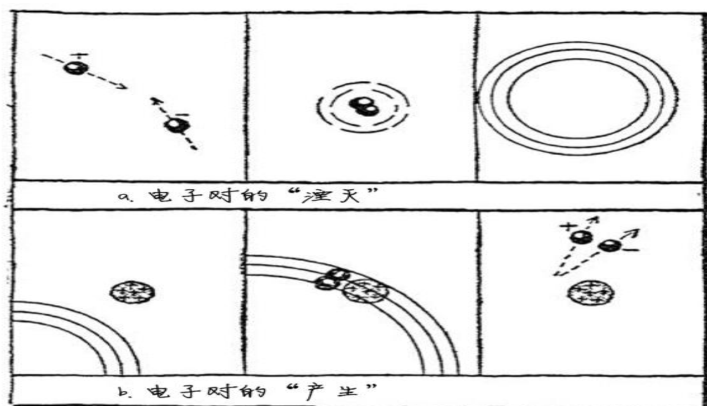


图 58

电子对在“湮灭”的过程中产生电磁波，和靠近原子核的电磁波“产

生”电子对的示意图。

有另一个与两个电性相反的电子“湮灭”的过程相对的过程，叫作“电子对的产生”，即由强烈的伽马射线“凭空产生”一对正负电子。这里我们说“凭空产生”，是因为这一对新生的电子实际上源于伽马射线提供的能量。事实上，形成电子对所需的能量，刚好与湮灭过程中释放的能量相等。电子对形成的过程通常会在辐射接近一些原子核的时候发生[9]，图58b给出了简单示意。这就是原本没有任何电性的地方凭空出现两种相对的电荷的例子，不过这并不令人惊讶，因为在日常生活中我们也遇到类似的情况，比如用硬橡胶棒和毛皮摩擦的时候就会起电。只要能量足够，我们就能制造任意数量的正电子和负电子，但必须考虑到，这些电子对会很快互相湮灭，原本消耗的能量又被“如数”交回。

一个有“大量电子对产生”的有趣例子是“宇宙线簇射”现象，这种现象是由星际空间飞入地球大气层的高能粒子流产生的。尽管这些在空旷的宇宙中纵横交错的粒子流的来源依旧是个谜[10]，但我们已经很清楚电子在高层大气中以极高速运动的结果了。

高速的初级电子在接近组成大气的原子的核时，会逐渐损失原本的能量，而以伽马射线的形式沿途释放（图59）。这一辐射又导致大量的电子对产生，新生的正负电子继续沿着初级电子的路径飞奔。这些次级电子仍带有相当高的能量，从而产生更多的伽马射线辐射，进而诞生更多的电子对。这个持续的倍增过程在电子穿越大气层的过程中重复发生多次，因而，当初级电子最终到达海平面时，伴随它的是一大群一半带正电、一半带负电的次级电子。不用说，这种宇宙线簇射也会在高速电子穿过其他大质量物体的时候发生，此时，因为物体的密度更高，分支的过程发生的频率也就更高。（见附录图版IIA）。

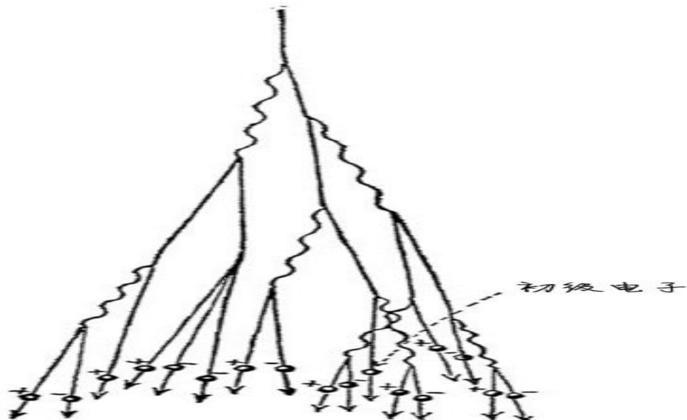


图 59

宇宙线簇射的起源。

现在将我们的注意力转向可能存在的负质子，我们推测这种粒子可能是由中子得到一个负电荷或失去一个正电荷而得到的。不难理解的是，这种负质子和正电子一样，不会在自然界中存在多久。事实上，它们会立刻被与之最近的带正电的原子核吸引并吸收，且很有可能在进入原子结构之后转变为中子。因此，即便这种能使现在的基本粒子表更加对称的质子确实存在于物质中，想要探测到它也绝不是一件轻松的事。要记得，正电子是在普通的负电子的概念被引入物理学将近半个世纪之后，才被发现的。假如负质子真的存在，我们可以设想，有一种原子和分子处于——某种意义上说——颠倒的状态，它们的原子核由普通的中子和负质子构成，外面则围绕着正电子层。这些“反”原子具有和普通原子完全一致的性质，就像你无法辨别出水和反水、黄油和反黄油等物质之间的区别，除非把普通物质和“反”物质放在一起。但是，一旦我们这样做，这两种物质内带有相反电性的电子就会立刻湮灭，两种带相反电性的核子会立刻中和，混合后的物质将产生比原子弹更剧烈的爆炸。

由上我们可以知道，宇宙中可能存在有和我们一样的，不过是由反物质组成的行星系统，如果从我们的行星系中飞去一块普通的石头，或反之，无论怎样，当它落到对面的行星上时都会变为一颗原子弹。

说到这里，我们就要抛下有关反原子的奇妙设想了，来考虑另一种基本粒子。它的物理性质不像反物质那么不寻常，在各种物理过程中都能见到它的身影——它就是所谓的“中微子”。中微子算是“走后门”才进

入物理学领域的，而且尽管来自各方的反对声从未停歇，但它依然在基本粒子家族中占据着不可撼动的地位。它是如何被发现，又是如何被辨认出来的？这是现代科学中最令人振奋的侦探故事之一。

中微子是通过一种被数学家称之为“反证法”的方法发现的。这一激动人心的发现并非开始于人们发现了什么东西，而是在这个过程中有什么东西丢失了。这个丢失的东西就是能量，而且，根据最古老也是最稳固的物理定律，能量既不能被创造也不能被毁灭，那么，如果发现本应存在的能量找不到了，就意味着肯定有一个扒手，或者是一伙窃贼，盗走了它。于是一些头脑有条理、热衷于给这些甚至他们还看不到的东西起名字的科学侦探，便将这个偷能量小偷称为“中微子”。

不过我们的故事讲得有点快了。我们先回到“能量大窃案”上来：前文中说过，原子核是由核子组成的，其中大约有一半是电中性的（中子），剩余的带有正电荷。如果给原子核加上一个或多个额外的中子或质子[11]，打破其中子和质子相对数量的平衡，那么就必定会发生电量的调整。若原子核内中子过多，就会有一些中子抛出负电子变为质子；若原子核内质子过多，则会有一些质子释放出正电子变为中子。

图60中示意了这两种过程。这样的原子电量调整通常被称为β衰变过程，原子核释放的电子被称为β粒子。因为原子核的转变是一个确定的过程，释放出的电子必然会携带一定量的能量，因此我们理所当然地认为，同一物质释放出的β粒子必定会全部以相同的速度运动。然而，观测到的有关β衰变的现象则与这一想法相悖。事实上我们发现，给定物质释放的电子的动能在0到某个上限之间。因为在这个过程中没有发现其他的粒子，也没有辐射能平衡这一差异，所以β衰变过程中“遗失的能量”成了十分严重的案件。曾有人认为我们遭遇了第一个著名的能量守恒定律失效的实验证据，如果是真的，这会是构建精巧的物理理论大厦过程中的一场大灾难。

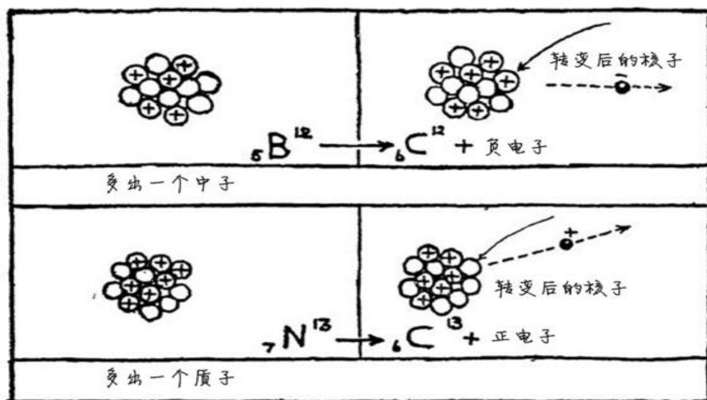


图 60

负β 衰变和正β 衰变的示意图（为方便展示，所有核子都画在同一平面上）。

但也有另一种可能：遗失的能量可能是被某种新的粒子带走了，它躲过了现有的一切观测手段的注视，悄悄溜走。泡利（Pauli）提出，盗窃核能的“巴格达窃贼”[12]可能是一种假想中的粒子，名为中微子，它不带电，质量不超过电子的质量。

事实上，根据已知的关于高速运动的粒子与物质的相互作用的事实，我们可以总结出，这种不带电的轻粒子不会被现存的任何一种物理仪器探测到，并且完全可以轻易地穿过任何厚重的屏蔽材料。对于可见光来说，只需一根细金属丝就能将其完全阻拦；即使是穿透性极强的X射线和伽马射线，也难以逾越几英寸的铅板；然而，一束中微子却能够轻松穿透几光年厚的铅块！所以，它们能逃脱所有的观测和搜索这一点，也就不足为奇了。我们只能通过损失的能量才能注意到它们。

尽管我们不能在中微子逃脱原子核的时候就抓住它们，但我们还是能研究由于它们的离开而造成的次级效应。当你开枪时，枪托会砸在你的肩膀上；在发射出一颗重炮弹之后，大炮也会向后退去。同样地，力学反冲效应也应当会在原子核射出高速粒子的时候发生。而且事实上，我们观察到发生β衰变后的原子核，通常会获得一个与抛射出的电子方向相反的速度。但核反冲的特性是，无论被抛射出的电子速度是快是慢，原子核的反冲速度永远是一样的（图61）。这听起来十分古怪，因为我们理所当然地认为，更快的抛射物会造成更强的反冲。关于这个谜

题的一种解释是，原子核在释放电子的同时必定也会释放一个中微子，这一中微子就是导致这种平衡的原因。如果电子运动得更快、携带更多的能量，那么中微子的速度也会相应地更慢，反之亦然，因此我们才会观察到原子核的反冲速度恒定不变，这是两个粒子共同作用的结果。如果这一效应还不能佐证中微子的存在的话，就没有别的办法了！

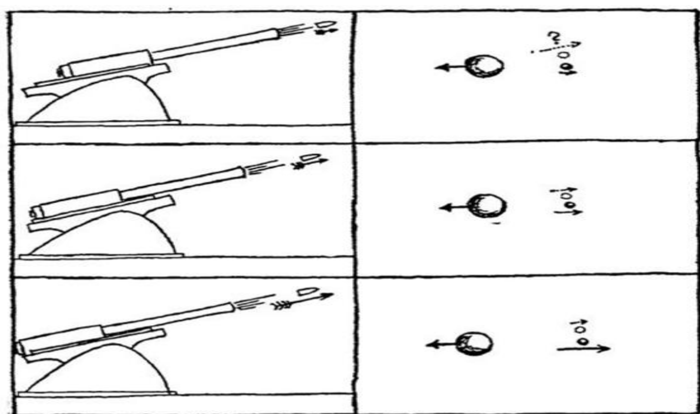


图 61

火炮和核物理中的反冲问题。

现在我们已经准备好汇总一些之前讨论的结果，并展现参与宇宙结构构建的基本粒子的完整列表以及它们之间存在的关系了。

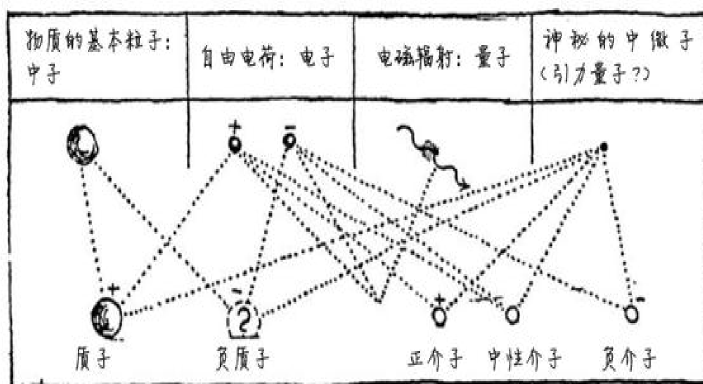


图 62

现代物理学的基本粒子图及其不同的组合方式。

首先，我们有核子，它是基本物质粒子。基于现今已知的知识，我

们知道它们呈电中性或者带正电，当然其中一些也可能带有负电。

其次，我们有电子，它是带有正电或负电的自由粒子。

然后还有诡秘的中微子，它不带电，质量可能远小于电子。[13]

最后是电磁波，它代表着电场力和磁场力在空间中的传播。

所有这些物理世界的基本组成都是相互依存，并且能够以各种方式相互结合的。因此，一个中子可以通过释放一个负电子和一个中微子变为质子（中子→质子＋负电子＋中微子）；一个质子可以通过释放一个正电子和一个中微子变回中子（质子→中子＋正电子＋中微子）；带相反电性的两个电子可以变为电磁辐射（正电子＋负电子→辐射），或反之，辐射也可以变为正负电子（辐射→正电子＋负电子）；最后，中微子可以与电子组合，形成我们在宇宙线中观测到的不稳定单元——介子，或者用一个不准确的说法，“重电子”（中微子＋正电子→正介子；中微子＋负电子→负介子；中微子＋正电子＋负电子→中性介子）。

中微子和电子结合后带有大量的内能，使得结合后的粒子的质量比原本两个粒子的质量之和还要重上百倍。

图62是参与宇宙结构构建的基本粒子的示意图。

“但这就完了吗？”你可能会问，“我们凭什么认为这些核子、电子和中微子就已经是最基本的、不能再被分割成更小的组成部分了呢？原子是不可分割的思想直到半个世纪前还是根深蒂固的，看看如今情况变得多复杂！”尽管我们无法预测物理学未来的发展，但我们现在有更充分的理由相信，这些基本粒子已经是最基础的单元，不能再被进一步分割了。因为曾被断言是不可分割的原子，显示出了完全不同的复杂的化学、光学以及其他性质，而现代物理学中的基本粒子的性质却是很简单的。事实上，它们的性质就如同几何学中的点一样简单。此外，相比经典物理学中大量的不同的“不可分原子”，我们如今只剩三种不同的实体了——核子、电子和中微子。

而且无论我们如何期望、如何努力地将万物都化为最简单的形式，我们也不可能将一切都化为虚无吧。因此，目前来说，我们似乎已经探

到了组成物质的基本单元的最底部了。[14]

2.原子之心

现在我们已经彻底熟悉了参与物质结构构建的基本粒子的本质和性质了，我们可以转向对原子核——原子之心——的更为深入的研究上了。虽说原子的外部结构在某种程度上可以类比为微缩的行星系统，但原子核本身的确表现出完全不同的画面。首先需要明确的是，维持原子核结构的力的本质并不纯粹是电磁力，因为有一半的核粒子（中子）是不带电的，而另一半（质子）则带有正电，质子之间还会相互排斥。显然，你无法把一群相互厌恶的粒子稳定地结合起来！

因此，为了理解原子核的组成部分为何能团聚起来，我们必须假设在中性核子和带电核子之间存在一种作用力，使它们相互吸引。这种与涉及的粒子本身无关，只是将它们束缚在一起的力，通常被称为“内聚力”（cohesive forces），我们在普通的液体中就会经常遇到，它能够防止分子朝各个方向分散。

在原子核中也有类似的内聚力作用于各个核子之间，以防止整个原子核因为质子相斥而瓦解。因此，相比原子的外层部分中，在不同壳层围绕原子核旋转、有足够的运动空间的电子，原子核中的大量核子就像一个沙丁鱼罐头一样被紧压在一起。本书作者最先提出，我们可以假设原子核的物质组成方式和普通液体是同理的。所以正如普通液体一样，我们认为原子核内部也有重要的表面张力现象。大家应该记得，液体表面的张力现象，是因为液体内部的粒子受到了周围各个方向的均匀拉扯，而位于表面的粒子只受到向内部的拉力（图63）。

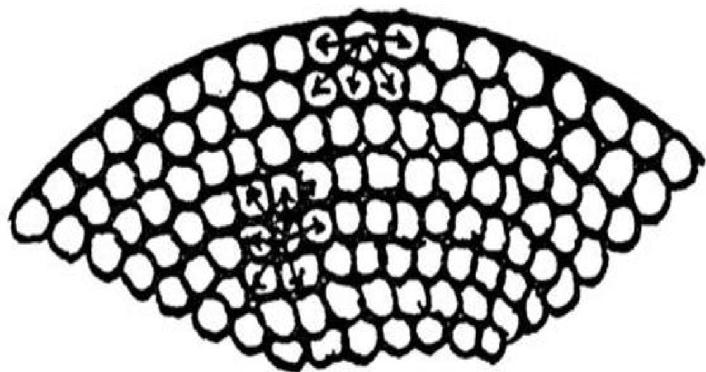


图 63

对液体表面的张力的解释图。

这导致所有液滴都不会受到外力影响，而产生形成球体的趋势，因为在相同体积下，球体是表面积最小的形状。因此我们得出结论：不同元素的原子核，可以被简单地认为是性质相似、尺寸不同的“核流体”液滴。不过我们不要忘记，尽管核流体和普通液体从定性角度上看十分相似，但从定量角度上看却大不相同。事实上，核流体的密度超过水240 000 000 000 000倍，而它的表面张力大约是水的1 000 000 000 000 000 000倍。为了让这些无比巨大的数字更容易理解，我们可以参考下述的例子。假设我们有一个倒“U”形的金属框架，边长大约2英寸，我们在其底部搭上另一根直的金属丝，如图64所示，在围成的区域内填满肥皂液膜。肥皂液膜的表面张力会迫使金属丝上移，我们可以在金属丝上加上一点重量来抵消表面张力。如果这层液膜是由水和溶解在其中的肥皂组成的，厚为0.01毫米，那么它大约重0.25克，并能额外支持0.75克的重量。

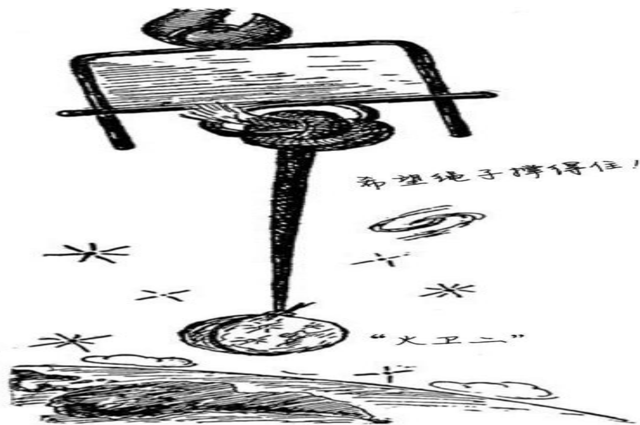


图 64

现在，如果我们能用核流体制作同样一张膜，它的总重量大约是5 000万吨（约等于1 000艘跨洋巨轮的总重量），并且我们还能在金属丝上挂上大约1万亿吨的物体，相当于一个“火卫二”的质量！由此来看，要从核流体液膜上吹出一个肥皂泡，得需要多强的肺脏啊！

若要把原子核看作核流体液滴，我们必定不能忽视这些液滴是带电的这一事实，因为其中约有一半是质子。它们产生的电斥力会试图将原子核分离成两个或更多的部分，相对地，其表面张力则倾向于使其保持一体。这就是原子核的不稳定性的根本原因。如果表面张力占了上风，那么原子核就绝不会解体，而两个相遇的原子核则会倾向于像普通的液滴那样融合（即“聚变”）；反之，如果电斥力占了上风，那么原子核就会显示出自行分裂的趋势，分裂为两个或多个高速分散的碎块，这一过程通常被称为“裂变”。

1939年玻尔和惠勒（Wheeler）精确计算出了不同元素原子核中的表面张力和电场力，得到了极其重要的结论：在位于元素周期表前半段的元素（大约到银为止）中，其表面张力占据了上风；而在更重的原子核中，则是电斥力占据优势。因此，比银更重的所有元素的原子核，原则上都是不稳定的，并且在受到来自外部的足够强烈的推动的情况下，会分裂为两个或更多碎块，同时伴随着巨大的内部核能释放（图65a）。反之我们也可以认为，总原子量在银以下的更轻的原子核会发生自发的聚变过程（图65b）。[15]

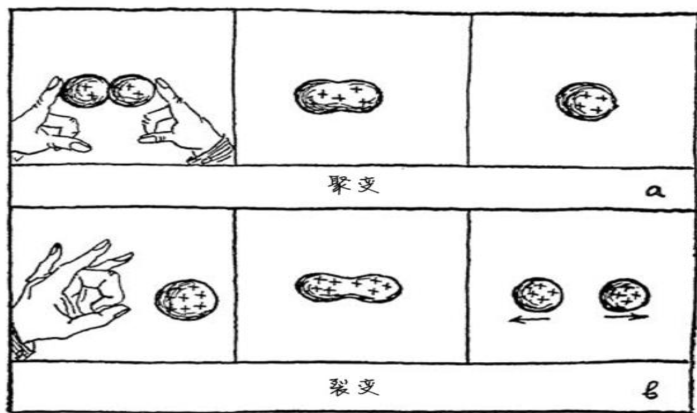


图 65

但必须记住的是，无论是两个轻核的聚变，还是一个重核的裂变，在一般情况都不会发生，除非我们人为地做了什么。实际上，为使两个轻核发生聚变，我们必须克服电斥力，使二者离得足够近；而若要使重核发生裂变，我们则需要猛击它一下，使其以相当大的幅度振动。

这种必须要经过激发过程才能开始作用的状态，在科学中通常被称为亚稳定态，例如悬崖边立着的石块、口袋里的火柴或炸弹里的TNT，都处于亚稳定态。在这些例子中都存在大量的能量可以被释放，但除非用脚踢石块、用鞋底或其他东西摩擦火柴头、用引线引爆TNT，否则它们都不会被触发。

我们居住的世界里，除了银币[16]之外几乎所有物体都是潜在的核爆炸物，只是因为启动核反应的难度极大，或者用更科学的语言来说，启动核嬗变的活化能极高，才不会全都炸成碎渣。

在核能领域内，我们的处境（或者说我们不久前的处境）很像一个因纽特人。他们生活在零下温度的环境中，身边的固体只有冰、液体只有酒精。这样的因纽特人从未听说过火，因为他无法用两块冰摩擦生火，而酒精于他们而言只不过是消遣用的饮品，因为他也无法将酒精加热到燃点。

人类新近发现原子的内部可以释放出巨大的能量时的震惊程度，就如同我们设想的因纽特人第一次发现酒精可以燃烧时的诧异程度一样。

不过，一旦启动核反应的困难被克服，所有的困难都将得到相应的

回报。以等量的氧原子和碳原子为例，其化学反应式如下：



O＋C→CO＋能量

每克混合物会带给我们920卡路里[17]的能量。

如果这两种原子之间不是普通的化学结合（分子融合）（图66a），而是“炼金术”结合（核聚变）呢？（图66b）那么应该是：

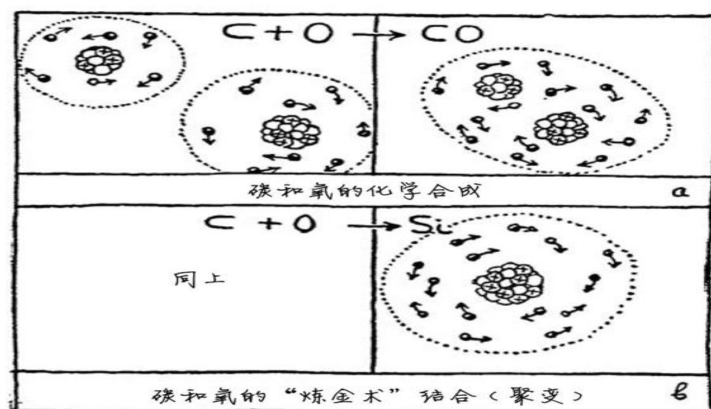
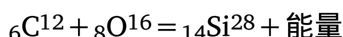


图 66



$_{6}C^{12}+_{8}O^{16}=_{14}Si^{28}+$能量

此时每克混合物释放的能量将是14 000 000 000卡路里，是化学反应的15 000 000倍。

类似地，将TNT分子裂解成水分子、一氧化碳、二氧化碳和氮气（分子融合，通俗来说就是TNT爆炸），则每克释放约1 000卡路里，而相同原子量的汞裂变的过程，能够释放10 000 000 000卡路里的能量。

不过不要忘记，大多数化学反应都可以轻易地在几百摄氏度的温度下发生，而对应的核嬗变则只在温度达到几百万摄氏度时才会启动！核反应难以启动这件事给了我们莫大的慰藉，因为这意味着，整个宇宙不会因为一场大爆炸就全部变成纯银。

3.轰击原子

尽管原子量的整数值为原子核的复杂性提供了强有力的证据，但最终我们是通过将某种原子核破裂成两个或多个单独的碎片的直接实验证据，才证明了这一复杂性的。

50年前（1896年）贝克勒尔（Becquerel）发现了放射性，那时我们才发现这种碎裂过程真的会发生。事实上，一些位于元素周期表最后端的元素，如铀和钍，会自发地释放一种具有高穿透性的辐射（类似于普通的X射线），这源于这些原子的自发衰变。科学家对这一新发现的现象进行了细致的实验研究，很快得到结论：重原子核会自发衰变，碎裂成两个不等的部分——（1）一个小的碎片，称为α粒子，即氦原子核；（2）初始原子核的剩余部分，是子元素的原子核。初始的铀原子核碎裂时会抛出一个α粒子，余下的子元素的原子核被称为铀–XI，后者经过内部电荷调整，释放出两个负电荷（普通电子），变为铀同位素的原子核，它比原来的铀原子轻4个单位。紧接着又进行了一系列的α粒子释放和电荷调整过程，最终得到的是铅原子核，它看上去十分稳定，不会再衰变了。

在另外两个放射性系中，也发现了类似的交替释放α粒子和电子的连续放射性嬗变过程：以钍为首的钍系，和以锕–铀（即锕元素）为首的锕系。在这3个系中自发衰变会持续进行，直到仅剩铅的3种同位素为止。

细心的读者在比较上述对自发放射性衰变的描述和前文的讨论后会惊讶地发现，之前说过，原子核的不稳定性应该存在于整个元素周期律的后半部分，因为它们内部的电斥力凌驾于使原子核保持一体的表面张力之上。那么，既然所有重于银的原子核都是不稳定的，为什么自发的衰变过程只在最重的几种元素——铀、镭和钍——中观测到了呢？答案是：虽然从理论上来说，所有比银重的元素都必须视为放射性元素，事实上它们也确实在缓慢地衰变为更轻的元素，但在绝大多数情况中，这种自发衰变十分缓慢，因而我们没法察觉到它。因此我们熟悉的元素，例如碘、金、汞和铅的原子，在几个世纪内才会有一两个原子发生衰变，如此缓慢的速度，连如今最敏感的物理仪器也无法记录。只有在最

重的那些元素中，自发衰变的趋势才足够明显到能被我们观察到放射性。[18]这种相对的嬗变速率还决定了不稳定的核分裂的方式。以铀原子核为例，它能够以多种不同的方式分裂：可以自发分裂成两个相等的部分、三个相等的部分或者几个大小各不相同的部分。但其中最容易发生的，还是分裂为一个α粒子和一个子元素原子核，这种方式发生的频率也最高。我们观察到铀原子自发碎裂成两个相等部分的可能性，是释放α粒子的百万分之一。在1克铀中，每秒大约有1万个原子核释放α粒子，但若想要见证一个铀原子核碎裂成两个相等的部分，我们则要等上好几分钟！

放射性现象的发现排除了一切质疑原子结构的复杂性的说法，并为人造（或者说人工诱导）核嬗变的实验铺平了道路。

接下来的问题是：如果重核（尤其是那些不稳定的重核）会自发进行衰变，那我们能不能用高速运动的核发射物，狠狠地轰击在一般情况下稳定的元素，使其原子核分裂呢？

在这一想法的驱使下，卢瑟福决定，要让各种在通常情况下稳定的元素的原子核，遭受来自不稳定放射性原子核自发分裂产生的核碎片（α粒子）的强烈轰击。卢瑟福在1919年第一次核嬗变实验中所使用的仪器（图67），与现在大多数物理实验室中使用的巨型原子对撞机相比，简直简单到了极致。那台仪器仅仅包括一个用来制造真空环境的圆筒容器，以及位于底部作为显示屏的一扇涂满荧光物质的薄窗（c）。用来轰击的α粒子源是镀在金属片上的一层放射性物质薄层（a），而遭受轰击的元素（此实验中为铝）则以细丝（b）的形式放在距离粒子源不远处的位置。细丝靶的位置能够保证所有入射的α粒子都能嵌入它，因此，如果轰击没有产生次级核碎片的话，α粒子是不会在荧光屏上显像的。

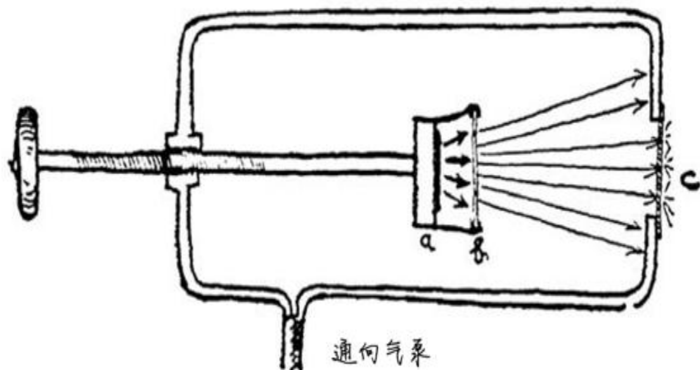


图 67

分裂原子的第一次实验。

一切准备就绪后，卢瑟福通过显微镜向荧光屏看去，他看到的绝非一片漆黑，整个荧光屏上有无数的亮点在闪烁跳跃，如同鲜活的生命一般！每一个亮点都是在一个质子碰撞到荧光屏上的物质时产生的，而每个质子则都是在入射的α粒子中靶之后，从铝原子中被“踢出”的。因此，人工嬗变这一理论成为科学上的既有事实。[19]

在卢瑟福的经典实验后的数十年间里，元素的人工嬗变这一科学成为物理学中最大也是最重要的分支之一，有关产生能造成核轰击的高速粒子的技术及观测结果的方法都取得了长足的进步。

云室（亦称威尔逊云室，由其发明者命名）是能够让我们用肉眼就看到核发射物轰击原子核的最理想的仪器，其示意图如图68所示。它的运作基于高速带电粒子（如α粒子）在穿过空气或其他气体时，会给路径上的原子带来一定扰动这一事实。借助它们强大的电场，这些粒子能够从沿途的气体原子中扯出一两个电子，留下大量电离的原子。这一情况不会持续很久，很快这些粒子路径上电离的原子会再次捕获电子，回到正常状态。但如果这种电离态的气体中充满了饱和水蒸气，那么每个离子上都会形成小水滴——水分子有倾向于吸附在离子和灰尘粒子等周围的性质，它们沿着粒子的轨迹产生一条细细的雾带。

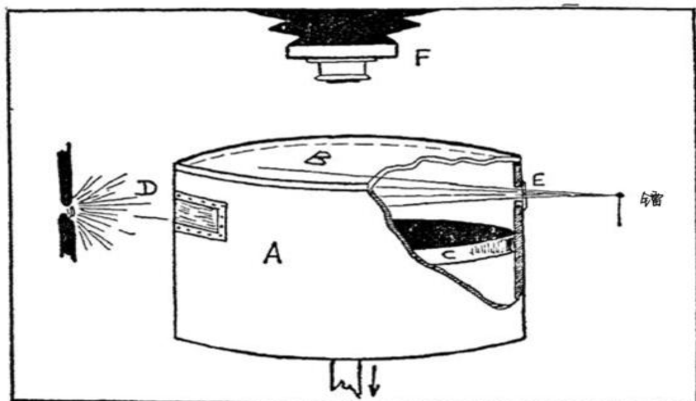


图 68

威尔逊云室的示意图。

换句话说，任何穿过气体运动的带电粒子都会变得可见，正如在天空中划出尾迹的飞机一般。

从技术角度来看，云室是非常简单的仪器，其主体只是一个金属圆筒（A），筒上盖着一块玻璃盖子（B），其中装有一个活塞（C），可以上下运动（运动部件未画出）。玻璃盖子和活塞之间的空间充满了普通的空气（或者如果有需要的话，换成其他任何的气体也行），其中含有大量的水蒸气。如果在粒子从窗口（E）进入云室后立刻下拉活塞，上面的空气就会冷却，从而使水蒸气凝结成小水滴，这些小水滴沿粒子的轨迹以细雾带的形式存在。这些细雾带会被从侧面窗（D）射入的强光照亮，与黯淡的活塞表面形成鲜明的对比，于是我们就可以用肉眼进行观测或用相机（F）照相了，相机可以在活塞运动的同时自动完成拍照。这一简单的设备，也是现代物理中最有价值的仪器之一，它使我们能够获得核轰击结果的完美照片。

我们自然期望能有一种方法，可以简单地通过在强电场中加速各种带电粒子（离子）就获得高速粒子束。这种方法不需要使用稀有且昂贵的放射性物质，仅仅使用其他种类的粒子（如质子），就能获得比普通的放射性衰变更大的动能。其中，能够制造这种高速粒子的几种最重要的仪器分别是静电发生器、回旋加速器和直线加速器。图69、图70、图71分别为它们的示意图，配以简短的功能描述。

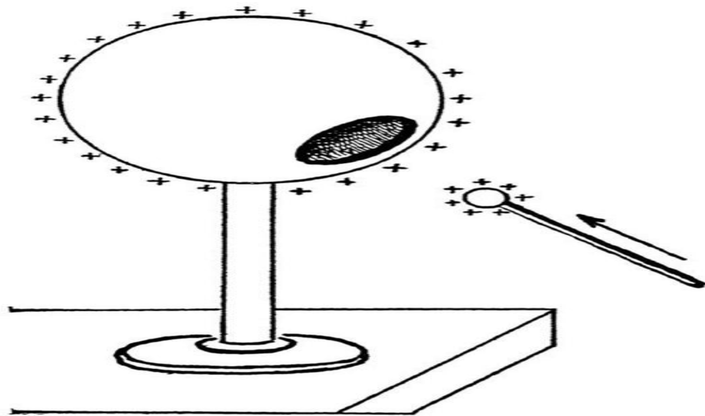


图 69

静电发生器的原理。众所周知，根据基本物理学原理，传递给球形金属导体的电荷会分散在其表面，因此我们可以在空心金属球表面开一个小洞，然后将一个小的带电导体伸入洞内，与内表面接触，从而让金属球带上任意强度的电压。在实际应用中，我们使用的是一条通过小洞伸入球形导体的传送带，由它把小型感应起电器产生的电荷带到球上。

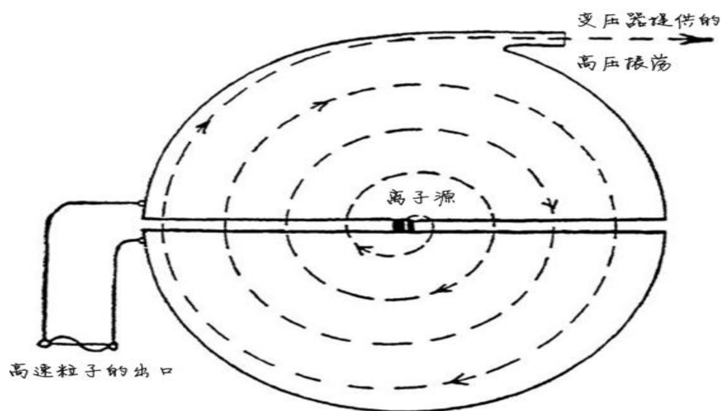


图 70

回旋加速器的原理。回旋加速器主要包括两个置于强磁场（方向垂直于画面）中的半圆形金属盒。两个金属盒由一台变压器相连，并交替携带正电和负电。从中心位置的发射源射出的离子在磁场中沿环形轨迹运动，并在通过两个金属盒之间时得到加速。离子的速度越来越快，划出一道向外扩展的落线，最终以极高的速度飞出。

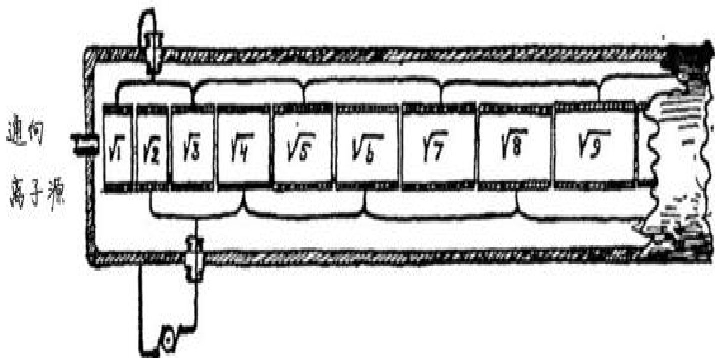


图 71

直线加速器的原理。这种仪器包含一系列长度逐渐增大的圆柱体，由变压器交替通上正电和负电。离子在从一个圆柱体飞往另一个圆柱体时，会因为电势差而逐渐加速，因此其能量也逐渐增大。因为速度与能量的平方根成正比，所以只要圆柱体的长度与整数的平方根成比例，离子就会和交变电场保持同相位。只要将这种仪器设计得足够长，我们就可以将离子加速到任意速度。

将上述几种加速器产生的强大粒子束引向不同的靶材，我们就能得到大量的核嬗变，从而通过云室照片轻松地研究它们。附录图版III、图版IV分别展示了不同核嬗变过程的照片。

布莱克特（P. M. S. Blackett）在剑桥大学拍摄下了这样一张照片，它表现了一束天然的α粒子穿过充满氮气云室的情形。[20]这张照片让我们第一次看到，所有轨迹都有确定的长度，因为在穿透气体的时候这些粒子会逐渐丧失动能，最终停下。轨迹长度明显分为两组，对应粒子源（两种不同的α粒子发射元素：ThC和ThC^{1}）中产生的两种不同能量的α粒子。值得注意的是，α粒子的轨迹总体来说都是笔直的，直到最后它们丧失了大部分的原始能量，才会与氮原子核发生非正面碰撞，从而显示出不同角度的偏折。在这张星状的粒子图中，有一道α粒子的轨迹显示出独特的分叉，一支长而细，另一支短而粗，这显示了入射的α粒子和云室中的一个氮原子直接碰撞的结果。没有第三条轨迹对应反弹出去的α粒子的事实表明，入射的α粒子已经附着在氮原子核上，与其一同运动。

在附录图版IIIB中，我们看到人工加速的质子与硼原子核碰撞的效应。高速质子束从加速器喷口（图片中间的黑暗阴影）射出，撞上放置在开口外的硼片，使得核碎片飞向各个方向。有趣的是，这张图片中的碎片似乎永远是三个为一组（共有两组，其中一组标上了箭头），因为被质子轰击的硼核碎裂成了三个相等的部分。[21]

另一张图片，附录图版IIIA展现了高速运动的氘核（由一个质子和一个中子构成的重氢的原子核）和靶材中其他氘核的碰撞。[22]图片中更长的轨迹对应质子（$_1H^1$原子核），更短的轨迹对应超重氢的原子核，或者叫氚核。

没有涉及中子的核反应的云室相片是不完整的，因为它和质子是每个原子核的基本单元。

追踪中子在云室中的轨迹看似是一场徒劳的工作，因为它不带电，这些“核物理”中的“黑马”穿过物质时，不会产生任何电离。但如果你能观察到从猎人的枪中冒出的烟及从天空中坠落的野鸭，你就会意识到这把枪射出了子弹，尽管你看不到它。同样的道理，在观察附录图版IIIC中展示了氮原子核碎裂为氦（向下的轨迹）和硼（向上的轨迹）的云室照片时，你一定会意识到，这个原子核被来自左侧的某个看不到的粒子撞上了。而事实也是，为了得到这样的一张照片，你必须在云室的左壁放上镭和铍的混合物，它们能产生高速中子。[23]

中子穿过云室的直线轨迹，可以通过连接中子源和氮原子核碎裂的位置快速得出。

附录图版IV展示了铀原子核的裂变过程。这张照片是由包基尔德（Boggild）、布罗斯多姆（Brostrom）和劳里森（Lauritsen）拍摄的，它展现了铝箔上的铀层裂变后，两个碎片飞往相对的方向的现象。当然，这张照片是显示不出制造这次裂变的中子和裂变后产生的中子的。我们通过电加速粒子，使其轰击原子核，从而制造出无穷无尽的各种核嬗变过程，但现在我们要转移到一个更重要的问题上，即这些轰击的效率。必须要记得，附录图版III、图版IV中显示的图片表示的是单个原子分裂的个例，如果要让1克的硼完全转变为氦，我们需要击碎其中的全部55 000 000 000 000 000 000 000个原子。如今，最强劲的加速

器每秒能产生1 000 000 000 000 000个加速的粒子，因此，即使能保证每个粒子都能击碎一个硼原子核，我们也需要持续开动机器5 500万秒，也就是大约两年，才能完成任务。

但事实是，各种加速器产生的带电粒子的效率要远低于此——通常几千个粒子中只会有一个能造成靶材中的原子核碎裂。为什么核轰击的效率如此之低？其原因是：原子核周围被电子层环绕，它会降低穿透其间的带电粒子的速度。因为电子层的靶面要远大于原子核的靶面，况且，我们自然不能将粒子直接瞄向原子核，所以每个粒子都必须刺破大量的电子层，最终才有机会给其中一个原子核致命一击。图72绘出了这一情形，黑色小球表示原子核，而灰色阴影则表示电子层。

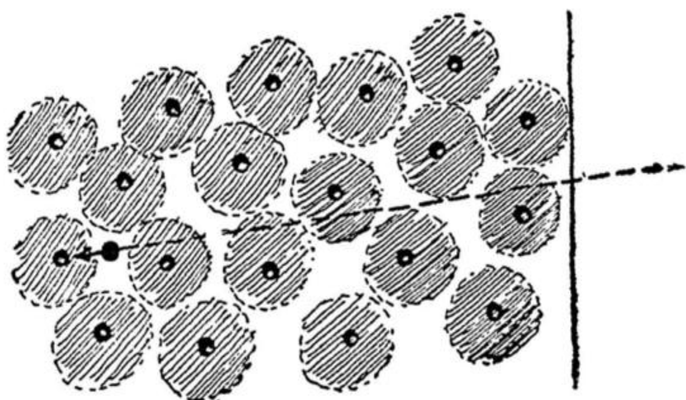


图 72

原子的直径约是原子核的10 000倍，因此靶面的比例是100 000 000：1。另外，我们知道带电粒子穿过原子的电子层时会损失大约万分之一的能量，因此它在穿过约10 000个原子之后就会彻底停下。上面引用的数据告诉我们，在10 000个粒子中，只有一个有可能在它的初始能量被电子层消耗殆尽之前撞上原子核。考虑到带电粒子轰击靶原子核的效率是如此的低，如果我们想要完全转换1克硼的话，就需要现代原子对撞机持续运作20 000年！

4.核子学

“核子学”其实是十分不恰当的用词，但如同许多惯用语一样，我们只能接受这个词。正如“电子学”被用来描述自由电子束的实际应用这一宽泛领域一样，“核子学”应当被理解为对核能大规模释放的实际应用的科学。我们在前面的部分已经看到，各种化学元素（除了银）的原子核都负载了大量的内能，能够以轻元素核聚变或者以重元素核裂变的形式释放。我们也看到了利用人工加速带电粒子实现核轰击的方法——尽管它在对各种核嬗变的理论研究中起到了至关重要的作用，但因效率极低，所以不能指望它产生什么实际的应用。

普通粒子（如α粒子、质子和其他粒子）带有电荷，它们在穿透原子的时候会丧失能量，因而效率极低，并且无法与轰击靶材的带电原子核靠得足够近，所以我们只能期望于使用不带电的中子轰击各种原子核能够获得更好的结果。然而问题又来了！因为中子能够轻易穿透原子结构，所以它们不以自由的形态存在于自然界中，而且当一个自由中子被入射的粒子人工“踢出”原子核之后（例如，铍原子核在α粒子的轰击下就会产生一个中子），它很快就会被其他的原子核再度捕获。

因此，为了制造强力的中子束以用于核轰击，我们必须从某种元素的原子核中“踢出”每一个中子，这就又回到了使用低效率的带电粒子的问题。

不过有一种方法能解开这个死循环：如果能用一个中子“踢出”另一个中子，并且每个中子都能裂变出更多的中子，那么中子就会像兔子（类比图97）或受感染的组织中的细菌一样繁殖，很快，一个中子就能产生足够多的“子孙”，多到足以向一大块物质中每一个原子核发起进攻。

人们发现了使中子如此成倍增殖的特定核反应过程，这使得核物理学空前繁荣，从此，原本只关注物质最本质性质的核物理学走下了寂静的纯粹科学的象牙塔，陷入了报纸头条、狂热的政治讨论及发展惊人的工业与军事的喧嚣漩涡之中。每个读报的人都会知道，核能（通常称为原子能）可以由铀原子核的裂变过程释放，这一事实由哈恩（Hahn）和斯特拉斯曼（Strassman）于1938年发现。但认为裂变过程本身，也就是将重原子核分裂为两个近乎相等的部分的过程，有助于核反应的继

续，这一想法是错误的。事实上，裂变得到的两个碎片携带着大量电荷（分别约有铀核的一半），这会阻止它们靠近其他的原子核。这些碎片会在邻近原子的电子层中丧失原有的高能量，很快趋于静止，不再产生任何进一步的裂变。

裂变过程之所以会对能够发展为自我维持的核反应如此重要，是因为每个裂变的碎片在最终减缓速度之前，都会释放一个中子（图73）。

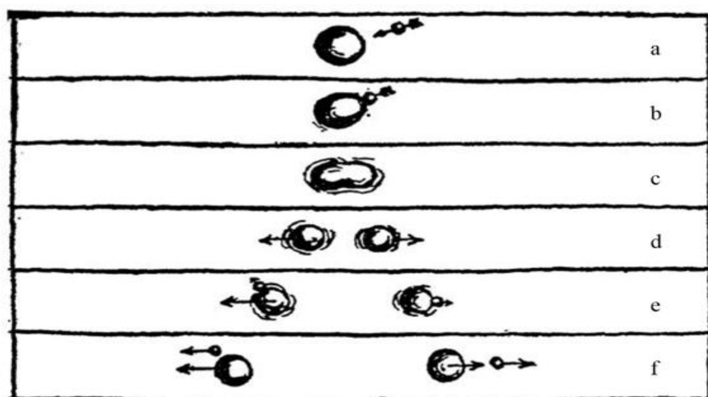


图 73

裂变过程的各个阶段。

裂变的这一特别的后效应缘于：碎裂后的重原子核的两个部分就如同断成两截的弹簧一样，会开始猛烈地振动。这种振动不会造成次级的核裂变（使得这两个碎片再分别分裂为两个碎片），但也强烈得足以将某些原子核的组成单元抛射出去。我们说“每个碎片释放一个中子”，只是从统计意义上表示，实际上，在某些情况下，一个碎片就能释放两个甚至三个中子——当然也有一个都不释放的。裂变后的碎片释放中子的平均数量自然取决于它振动的强度，而振动强度是由初始裂变过程释放的总能量决定的。因为从上文可知，裂变释放的能量会随着原子核的质量增加而增加，所以我们必定会认为，裂变碎片释放的平均中子数也随着其在元素周期表中位置序号的增加而增加。因此，在金原子核的裂变（因所需的初始能量过高，目前尚未实验成功）中，每个碎片释放的平均中子数会远小于一个；在铀原子核的裂变中，每个碎片释放的平均中子数约等于一个（每次裂变大约释放两个中子）。而在更重的元素的裂变（如钚）中，每个碎片释放的平均中子数应该大于一个。

为了使中子连续增殖，显然要让100个入射中子产生100个以上下一代中子。这一情况能否实现，取决于特定原子核裂变后产生中子的效率，也取决于每次裂变后产生的新中子的平均数量。必须记得的是，尽管中子要比其他带电粒子高效得多，但它们引发裂变的效率也不是100%。事实上，在进入原子核时，高速中子很可能只传递一部分动能给原子核，而带着剩下的一部分逃脱。传递出的能量会分别被几个原子核吸收，每一个原子核吸收的能量都不足以引发裂变。

由原子核结构的一般理论可以总结出，中子引发裂变的效率随元素原子量的增加而提高，在位于元素周期表末端的元素中，这一数值接近100%。

现在我们可以给出两个数学例子，一个有利于中子增殖，另一个不利于。①假设我们有一种元素，高速中子引发其裂变的效率是35%，而每次裂变产生的平均中子数是1.6个。[24]在这个例子中，初始的100个中子总共会引发35次裂变，得到35×1.6＝56个下一代中子。很显然这些中子的数量会很快跌落，之后每一代的数量都差不多只有前一代的一半。②假设有一种更重的元素，高速中子引发其裂变的效率是65%，而每次裂变产生的平均中子数是2.2个。在这个例子中，初始的100个中子总共会引发65次裂变，得到65×2.2＝143个下一代中子。因为新一代的中子的数量都会增加约50%，所以在极短的时间内，它们的数量就足以进攻和击碎样本中的任意一颗原子核。我们所说的这一过程叫作分支链式反应，能够发生如此反应的物质被称为可裂变物质。

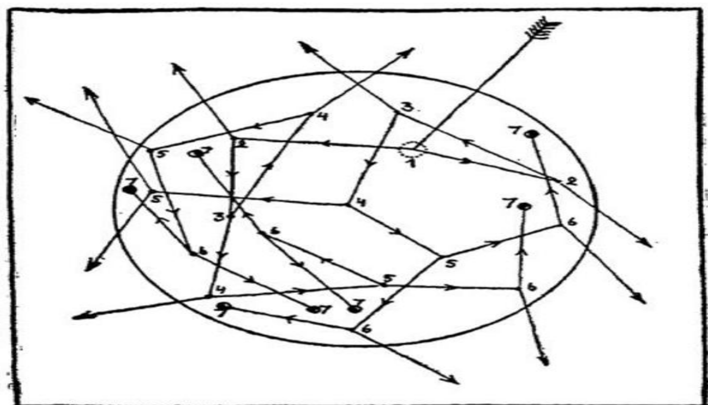


图 74

在球形可裂变材料中，由一个散射中子开始的核链式反应。

尽管有许多中子因为穿出材料表面而散失，但每一代中子的数量仍会增加，并最终导致一场爆炸。

对发生稳定的分支链式反应的必要条件进行细致的实验和理论研究之后，我们得出结论：自然界中存在的各种元素中，只有特定的一种核素能够进行这样的反应，就是铀著名的轻同位素——铀－235。

然而铀－235在自然界中并非单独存在，而是微量掺杂在更重的无法裂变的同位素铀里（天然铀中，铀－235占0.7%，铀－238占99.3%），其中的铀－238起到了阻碍稳定的分支链式反应的作用，如同水的存在能防止木柴燃烧一样。事实上，正是因为掺杂在铀－238这种不活跃的同位素其中，铀－235这一具有高裂变性的原子才能存在于自然界中，否则，很久以前它们就已经被快速链式反应完全摧毁了。因此，为了能利用铀－235中的能量，我们必须将其从更重的铀－238原子中分离出来，或者研究出能够中和铀－238原子核的干扰反应的方法，而不用分离它们。这两种方法都涉及了“如何释放原子能”这一研究课题，也都得到了圆满解决，这里我们只做简单的讨论，因为其中的技术问题不在本书的探讨范围内。[25]

直接分离两种铀的同位素是相当困难的技术问题，因为它们的化学性质一致，无法使用任何工业化学的常规方法进行分离，这两种原子的唯一区别在于它们的质量——其中一种只比另一种重1.3%，这意味着我们需要利用质量来分离原子，可以采用诸如扩散法、离心法或利用离子束在电磁场中的偏转等方法。在图75a和图75b中，我们给出两种主流的分离方法的示意和简短说明。

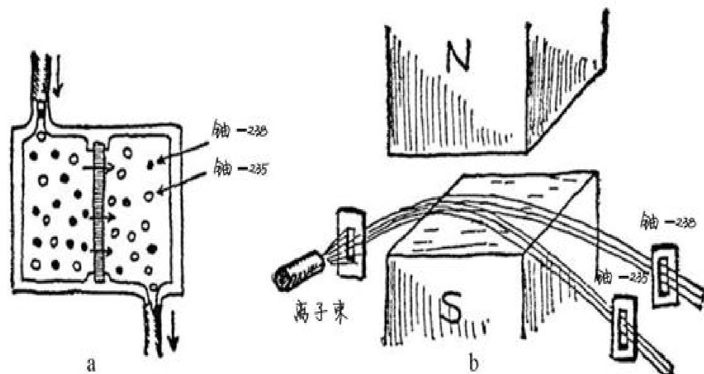


图 75

a.用扩散法分离同位素。包含两种同位素的气体被充入分离室的左侧，并透过中央的隔板向另一侧扩散。因为较轻的分子扩散得更快，所以铀-235会在右侧富集。

b.用磁场法分离同位素。离子束从强磁场中穿过，其中包含较轻的铀同位素的分子偏转的角度更大。为了获得更大的离子束强度，必须使用更宽的狭缝。分离的两束离子（铀-235和铀-238）会部分重叠，因此我们只能实现部分分离。

所有的这些方法的缺点在于，这两种铀同位素的质量差太小了，所以不能只用一步就完成分离，而是需要大量地重复操作，使得轻同位素逐渐富集。不过，只要重复的次数足够多，最终也能够获得足够纯净的铀－235样本。

一个更为机敏的方法，是借助所谓的减速剂来消除天然铀的链式反应中较重的同位素的扰动影响。为了能理解这个方法，我们必须记得一点，较重的铀同位素所带来的负面影响主要在于，它会吸收铀－235裂变产生的大部分中子，从而切断稳定的分支链式反应进一步发生的可能。

因此，如果我们能采取一些措施，防止铀－238原子核绑架中子，使后者有机会撞击铀－235原子核并顺利发生裂变，问题就能解决了。乍看之下，阻止数量是铀－235原子核的140倍的铀－238原子核得到大部分中子这件事是个不可能的任务，但是我们知道，对于运动速度不同

的中子，这两种铀同位素“俘获中子的能力”是不同的，这一事实帮助我们解决了这个问题。

对于来自裂变原子核的更快的中子，这两种同位素的俘获能力是一样的，因而铀－238俘获的中子数量是铀－235的140倍。然而，重要的是，铀－235原子核的俘获能力会随着中子运动速度的大幅减缓而显著增强。因此，如果我们能减慢裂变中子的运动速度，使其在遇到第一个铀原子核（铀－238或铀－235）之前就明显下降的话，那么纵使铀－235只占少数，它们也能拥有更大的俘获概率。

我们可以通过在小的天然铀块之间分撒大量的某种物质（减速剂）来实现这一必要的减速步骤，这种物质不仅能让中子减速，而且不会俘获太多的中子。这种物质的最佳选择包括重水、碳和铍盐。图76显示了大量的减速剂是如何同散布在其中的“铀块堆”发生作用的。[26]

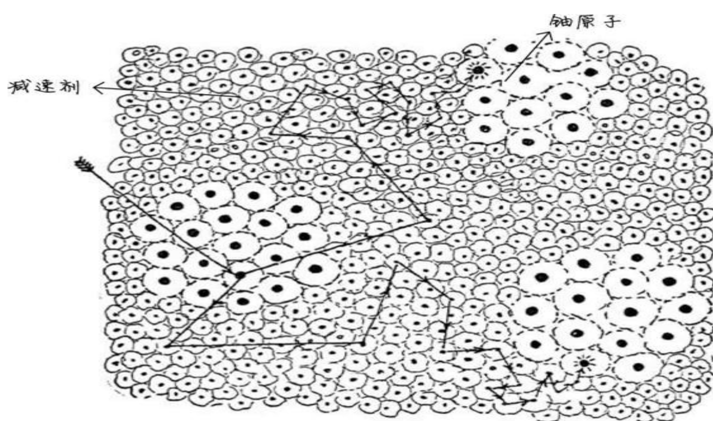


图 76

这张有点像生物细胞的图片，显示了一团团铀原子（较大的原子）嵌在减速剂物质（较小的原子）之中的状态。左侧的一团铀原子中的一个发生了裂变，产生的两个中子在与减速剂的原子核的持续碰撞中逐渐减速。当这两个中子到达另一团铀原子时，它们的速度已经慢到足以被铀-235俘获，因为铀-235俘获慢中子的效率要比铀-238高得多。

如上文所述，轻同位素铀－235（在天然铀中只占0.7%），是唯一存在的能够进行稳定的分支链式反应的可裂变原子核，能够产生大量的核能。但这并不表示我们就不能人工创造出其他在通常情况下自然界中

不存在的、与铀－235具有相同性质的核素。事实上，利用可裂变物质在稳定的分支链式反应中产生的大量中子，我们也能将其他原本不可裂变的原子核转变为可裂变的原子核。

上文描述的“铀块堆”就是第一个发生了这种情况的例子，它是天然铀与某种减速剂的混合物。我们知道，使用减速剂能降低铀－238俘获中子的概率，使得铀－235的原子核能够顺利发生链式反应。然而，有些中子还是会被铀－238俘获，这又会导致什么结果呢？

铀－238俘获中子后，必然是立即变成更重的铀同位素铀－239。但我们发现，这种新生成的原子核不会存在很长时间，它会接连释放两个电子，转变为原子序数为94的一种新的化学元素。这种新的人造元素被称为钚（plutonium，钚－239），其裂变性甚至比铀－235还要强。如果我们把铀－238换成另一种天然存在的放射性元素钍（thorium，钍－232），它在俘获中子并释放两个电子后，会产生另一种人造的可裂变元素——铀－233。

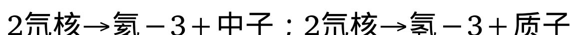
因此，从天然存在的可裂变元素铀－235开始，进行循环反应，理论上有可能将所有天然的铀和钍全部转变为可裂变的产物，这些产物可以被用作产生核能的浓缩源。

在结束本文之前，我们可以大致估计一下未来能够用于和平发展或自我毁灭的战争的能量的总量有多少。据估计，所有铀矿中包含的铀－235的总量能满足全世界工业长达数年的能源需求（全部转化为核能）。但如果我们将铀－238转变为钚的可能性也纳入在内，这一时间将延长到几个世纪。再算上储量是铀的4倍的钍矿（可变为铀－233），这一时间能上升到至少一两千年，足以消除有关“未来原子能短缺”的所有忧虑。

然而，即使我们将这些核能资源全部用尽，再也没有新的铀矿和钍矿被发现，我们的后代还是能从普通的岩石中获得核能。事实上，铀和钍同其他所有化学元素一样，少量存在于普通的物质中，比如每吨普通的花岗岩中，就包含4克铀和12克钍。乍一看这点含量似乎微不足道，但我们可以做一下如下计算。

我们知道，1　000克的可裂变物质如果直接爆炸（如原子弹），产生的核能等于20　000吨TNT，即使是作为燃料，其产生的能量也相当于20　000吨汽油。因此1吨花岗岩中包含的16克铀和钍，如果全部变为可裂变物质，就等于320吨普通燃料产生的能量。这已经足够抵消之前复杂的分离过程中的一切困难了——尤其在我们富矿源已经面临枯竭之时。

在征服了重元素（如铀）发生核裂变释放能量的问题之后，物理学家开始研究其逆向过程——核聚变，即两个轻元素的原子核融合在一起，形成更重的原子核从而释放巨大的能量。我们将在第十一章中看到，我们的太阳就是通过聚变过程获取能源的，氢原子核在其内部经过剧烈的热碰撞后，结合成更重的氦原子核。能够复制这种所谓的热核反应，使其为人类所用的最佳物质是重氢，或者说氘，它少量存在于普通的水中。氘原子核，简称氘核，包含一个质子和一个中子。当两个氘核相撞时，会发生以下两个反应中的一个：


2氘核→氦－3＋中子；2氘核→氢－3＋质子

为实现这种嬗变，氘核必须处于上亿度的温度下。

第一个成功实现核聚变的装置是氢弹，其中的氘核反应由一颗裂变原子弹触发。然而，一个更为复杂的问题是，如何才能产生可控的热核聚变从而用于和平用途呢？其中主要的问题在于如何将极度炽热的气体限制起来。要想克服这一难题，我们可以利用强磁场来阻止氘核接触容器壁（这个温度能直接熔化和蒸发容器！），从而将其束缚在高温的中心区域。

[1]　原子量的更准确说法是相对原子质量，前者表述的是带有单位的绝对量，后者表述的是不同原子相对某一标准的相对质量。这一标准目前是由碳－12原子质量的$\frac{1}{12}$所规定，粗略来看它可以相当于质子或中子的质量，因而前文中说其他原子的质量是氢原子的倍数这一点是有一定道理的。不过例如下文的例子（氯），相对原子质量是每个元素的各同位素分布量的加权平均与碳－12相比的结果，所以才会有结果不是

整数的情况，而实际上大部分元素的相对原子质量都不是整数，因为存在多种同位素（译注）。

[2] 因为较重的氯原子占25%，而较轻的占75%，所以平均原子量一定是：$0.25\times37+0.75\times35=35.5$，正好与化学家测定的相等。

[3] 希腊语中ισos意为相等，τoπos意为位置，结合之后，衍生为英语单词isotope，即同位素。

[4] 简单来说，质子和中子的转换方法是质子与电子相结合得到中子，反之亦然，但这只是简化的说法（译注）。

[5] 看一下原子量表，你会发现周期律的开始原子量等于原子序数的两倍，说明这些原子核包含相等数量的质子和中子。而更重的元素原子量增长得更快，表明中子的数量更多。

[6] 1955年反质子被真正探测到（译注）。

[7] 参见《原子物理》（Atomic Physics），波恩著（纽约G. E. Stechert & Co.出版社，1935年出版）。

[8] 参见《现代物理》（Modern Physics），布朗著（纽约John Wiley & Sons出版社，1940年出版）。

[9] 电子对形成的过程在很大程度上受到了原子核周围的电场的帮助，尽管原则上电子对的形成也可以发生在完全真空的环境中。

[10] 对于运动速度达到光速的99.999 999 999 999 9%的高能粒子的来源，最不可思议但可能也是最可信的解释是：它们是由可能存在于巨型气体和尘埃云（星云）之间的极高电势差加速而得到的。事实上，我们可以推测星际气体云可以像大气层中普通的雷雨云一样积累电荷，由此产生的电势差要比雷暴中云层间的闪电现象高得多。

[11] 这一过程可以通过核轰击的方式实现，我们将在稍后讨论。

[12] “巴格达窃贼”指的是1924年的美国同名电影（The Thief of Bagdad），改编自阿拉伯民间故事《一千零一夜》中的一则故事。这部

电影在当时颇为有名，在后来重制和翻拍了多次（译注）。

[13]　最新的研究结果表明，中微子的质量不超过电子的$\frac{1}{10}$。

[14]　随着量子物理的进一步发展，物理学家提出，核子也是能够进一步分割的。后来经实验证明，质子和中子都是由夸克这种更加基本的粒子构成的，准确来说，质子和中子中各有3个夸克，这3个夸克分别由胶子连接。在此之后，标准模型的提出进一步规范了基本粒子表，标准模型将基本粒子分为两类：费米子和玻色子。前者是组成物质的基本单元，包括夸克和轻子，其中轻子还包含电子、π子、τ子以及它们分别对应的3种中微子；后者是传递相互作用的粒子，有光子、胶子、W玻色子、Z玻色子以及希格斯玻色子。后来随着量子色动力学的提出，又进一步区分了各种粒子的不同味（favour），因而当今标准模型中总共包含61种基本粒子（译注）。

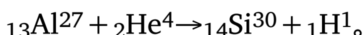
[15]　我们现在通常用比结合能来描述原子核中质子和中子结合的强度，同时反映原子核本身的稳定性。比结合能是结合质子和中子的核力除以核子数的结果。目前已知，铁－56的比结合能在所有元素的同位素中是最高的，相应地想要使其裂变，或加上一个原子聚变所需的能量是最高的，即铁－56是最稳定的（译注）。

[16]　记得银原子核既不会聚变也不会裂变。

[17]　卡路里是能量单位，定义为“1克水升高1℃所需的能量”。

[18]　以铀为例，1克铀中每秒有几千个原子发生衰变。

[19]　上文描述的过程可以用以下公式表示：



$_{13}Al^{27} + _{2}He^{4} \rightarrow _{14}Si^{30} + _{1}H^{1}$。

[20]　布莱克特的照片（本书未刊载这幅照片）中记录的核反应过程可以表示为：$_{7}N^{14} + _{2}He^{4} \rightarrow _{8}O^{17} + _{1}H^{1}$。

[21]　反应式是：5B11＋1H1→2He4＋2He4＋2He4。

[22]　反应式是：$_1H^2+{}_1H^2 \rightarrow {}_1H^3+{}_1H^1$。

[23]　此处发生的核反应的反应式如下。a.中子的产生：$_4Be^9+{}_2He^4$（镭产生的α粒子）$\rightarrow {}_6C^{12}+{}_0n^1$；b.中子撞击氮原子核：$_7N^{14}+{}_0n^1 \rightarrow {}_5B^{11}+{}_2He^4$。

[24]　这些数值纯粹是为了举例而选取的，不代表任何真实存在的原子核种类。

[25]　更详细的讨论可以参考塞利格·赫克特（Selig Hecht）所著的《解释原子》一书。初版由维京出版社于1947年印制，新版由尤金·拉比诺维奇博士（Dr. Eugene Rabinowitch）审核并增补。

[26]　关于铀块堆的更详细的讨论可以参考有关原子能的专著。

这里铀块堆的概念在后来发展为几乎所有核反应堆的核心组成，如今核电已经成为重要的电力来源（译注）。

第八章 混沌之律

1.热无序

如果你泼出一杯水然后观察它，你只会看到一摊清澈均匀的液体，看不出其中任何的内部结构或运动（当然前提是你没有摇晃杯子）。但我们知道，水的均匀性只是表面现象，如果放大数百万倍，水会显示出粗糙的粒状结构，它是由大量单独的水分子紧挨在一起而形成的。

在同样的放大倍率之下，你还能明显看到，水绝非处于静止状态，它的分子在剧烈地骚动，四处运动，相互推挤，好似高度兴奋的人群。水分子的这种不规则运动，或者其他任何物质中的分子的不规则运动，被称为热运动，是造成热量这一现象的最简单的原因。尽管分子的运动和分子本身不能直接用肉眼辨别，然而分子运动确实能对人体器官的神经纤维产生一定的刺激，从而产生所谓“热”的感觉。对于那些比人类小得多的生命，例如悬浮在水滴中的微小细菌，热运动的效应就更加明显了，这些可怜的小家伙被永不停歇的分子从各个角度攻击，不停地被踢来踢去，根本得不到安宁（图77）。这种滑稽的现象被称为布朗运动，以英国生物学家罗伯特·布朗的名字命名。一个多世纪前，他在研究植物花粉的时候首次注意到这个现象，并在后续的研究中发现，这是普遍存在的现象，我们在悬浮于任意液体中的任何足够小的微粒上，或者在空气中飘浮的烟雾或尘埃颗粒中，都能观察到这一现象。

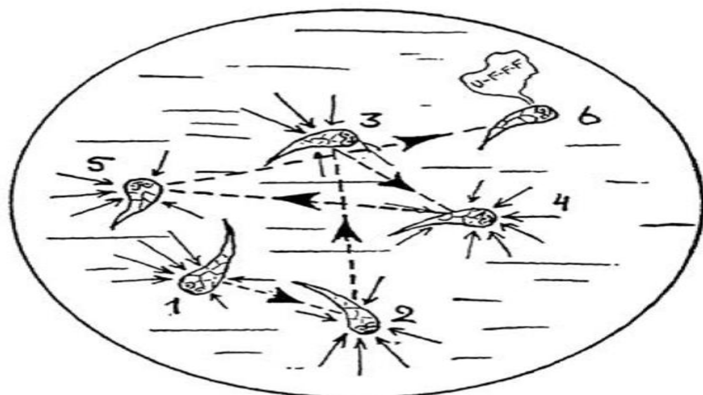


图 77

一个细菌与分子碰撞后被推来推去，连续改变了6次位置（此图在物理学上正确，但在细菌学上不完全正确）。

如果我们加热液体，那么悬浮在其中的微小粒子就会愈加猛烈地狂野舞蹈；反之，如果我们冷却液体，它们运动的强度也会显著降低。毋庸置疑，我们观察到的确实是物质隐藏的热运动效应，而我们通常所说的温度，只不过是对分子运动剧烈程度的一种度量。通过研究布朗运动对温度的依赖性，我们发现，在－273℃（或－459℉）的温度下，物质的热运动会完全停止，所有分子都会保持静止。很显然，这是我们能达到的最低温度，因而得到了“绝对零度”这一名称。如果说还有比这更低的温度，这显然是荒唐的，因为怎么可能会有比绝对静止还慢的运动！

在接近绝对零度时，所有物质的分子只含有极小的能量，因而作用于它们的内聚力会将它们黏合起来，形成一块固体，此时这些分子唯一能做的，只有在这个冰封的状态下微微颤动。随着温度升高，颤动会愈加强烈，到了一定阶段之后，分子获得了一定的运动自由性，可以相互滑动， 冰冻物质的刚性消失，变为流体。满足熔化需求的温度，取决于作用在分子上的内聚力的强度（图78）。一些物质，如氢气或组成大气的主要成分——氮气和氧气的混合物，其分子间的内聚力很弱，只需极低的温度就能打破它们的冰冻状态。因此，氢气只在14K[1]（－259°C）以下时才会变为固态，而固态氧和固态氮的熔点则分别为55K和64K（－218°C和－209℃）。一些物质中的分子间的内聚力更加强大，因而它们能够在较高的温度下保持固态：纯酒精在－130°C还能保持冰冻状态，而固态水（冰）直到0°C才融化。除此之外，其他的一些物质能在高得多的温度下继续保持固体状态：铅块在327°C时才会熔化，铁则是1 535℃，而稀有金属锇直到2 700°C都还是固体。尽管固态物质的分子被紧紧束缚在各自的位置上，但这并不意味着它们就不会受到热运动的影响。实际上，根据热运动的基本定律，任何物态——固态、液态、气态，在给定温度下，其每个分子中的能量数值都是相同的，唯一的区别在于，对于某些物质来说，这些能量足以让分子逃脱固定的位置，从而自由运动。而对于另外一些物质来说，这些能量只能使其分子在一个点位上颤动，如同被短锁链拴住的恶犬一般。

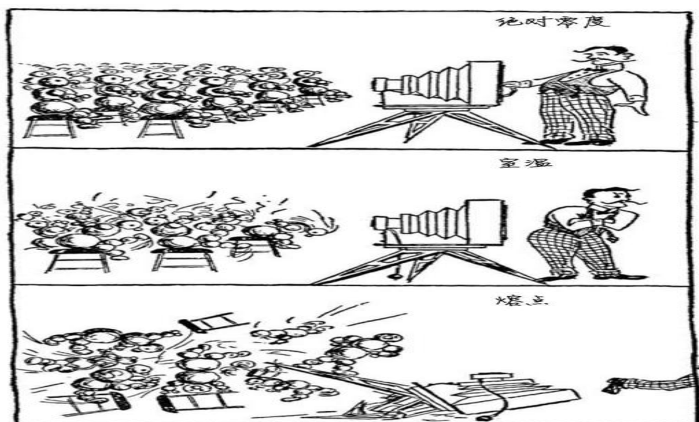


图 78

这种固体分子的热颤动，或者说热振动，在上一章中提到的X射线照片中就可以轻易地观察到。我们知道，因为拍摄晶格中的分子的照片确实需要大量的时间，所以在曝光的过程中保证它们不从固定的位置上移动是很有必要的。然而事实上，围绕固定位置的持续颤动会影响成像，得到的结果就是，会拍出一些模糊的照片。这一效应我们在附录图版I所示的分子照片中就能看到。所以，为了得到更清晰的照片，我们必须尽可能地冷却晶体——有时实验者会将其置于液态空气中。反过来说，如果有人加热晶体，照片就会越来越模糊，到达熔点时，晶格图案就会彻底消失。这是因为，熔化后的物质中的分子会离开自己原本的位置，开始无规则地运动。

固态物质熔化之后，其分子还会继续聚在一起，因为热运动虽然强到能将它们从晶格上的固定位置驱离，但还不足以彻底分散它们。不过当温度更高时，内聚力便再也无法使得分子聚集了，这些分子会四散飞去，除非周围有墙能阻止它们继续扩散，此时，物质自然就是处于气体状态。对于不同物质而言，固体熔化和液体蒸发这两种现象自然发生在不同的温度下，内聚力较弱的物体会先于内聚力更强的物体变为蒸汽。此外，这个过程也强烈依赖于帮助内聚力维持分子固定位置的外界压力。众所周知，水在密闭的水瓶中沸腾所需的温度，要高于在敞开的水瓶中需要的温度；反之，在高山之巅，因为那里的大气压要明显低于海平面，所以水在100℃以下就会沸腾。这里顺便提示一下，我们只需测量水沸腾时的温度，就能计算出所处位置的大气压和对应的海拔高度。

不过千万别跟着马克·吐温（Mark Twain）的例子走歪路，把无液气压计放进煮着豌豆汤的锅里。[2]这样做不会让你得到任何有关海拔高度的信息，其中的氧化铜反而会让你的汤变得很难喝。

物质的熔点越高，它的沸点也就越高：液氢的沸点是－253℃，液氧和液氮的沸点分别是－183℃和－196℃，酒精是78℃，铅是1 620℃，铁是3 000℃，只有锇的沸点能达到5 000℃以上。[3]

在固体美妙的晶体结构被破坏后，分子会首先像一群蠕虫一样爬来爬去，随后又如同受惊的鸟儿一样四散而飞，但此时并不意味着逐渐增强的热运动的破坏力已经达到了极限。如果温度继续上升，分子本身的存在甚至也将受到威胁，因为随着分子间碰撞得愈发剧烈，它们有可能会被撞碎成单个原子，这种现象被称为热分解。促发这一现象的温度取决于分子的强度，一些有机物分子仅在几百度下就能破裂成单个原子或原子团，还有一些更加坚固的分子，如水分子，当温度超过1 000℃时，它们的结构才会被破坏。然而，当温度上升到几千摄氏度时，没有任何分子能够留存下来，所有物质都会变为由纯粹的化学元素组成的混合气体。

这就是在我们的太阳的表面发生的情况，那里的温度达到了6 000℃。另外，在红色恒星较冷的大气层中，[4]一些分子仍能存在，我们能够通过光谱分析证明这一事实。

高温条件下，猛烈的热碰撞不只能破碎分子，使其变为一个个原子，甚至还能剥离位于原子外层的电子，进而损坏原子本身。随着温度上升到数万甚至数十万度，这种热电离现象会越来越显著，直到达到上百万度时，实现完全电离。这样的极高温度已经高于我们的实验室所能承受的范围。但在恒星内部，尤其在我们的太阳中，这一现象是普遍存在的，原子在那里将不复存在。所有的电子层都被完全剥离，物质变为一种等离子态混合物，裸露的原子核和自由的电子在其间以无比巨大的力量横冲直撞。然而，尽管此时原子的结构已经彻底瓦解，但这些物质依然会保留它们的基本化学属性，因为其原子核依然保持完整。一旦温度降低，原子核会重新捕获电子，再度形成完整的原子（图79）。

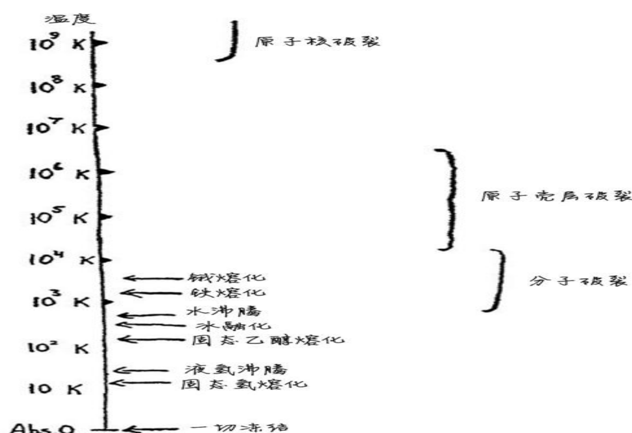


图 79

温度的破坏性效应。

要想使物质完全热分解，即将原子核本身也分裂为单独的核子（质子和中子），温度至少要上升到几十亿摄氏度。即使在最炽热的恒星内部，我们也找不到这样高的温度，尽管这个温度很有可能曾在数十亿年前出现过，因为那时我们的宇宙还年轻。我们将在本书最后一章继续讨论这个振奋人心的问题。

通过上述内容我们知道，热运动效应会一步步摧毁基于量子定律构建的物质的精巧结构，将这些宏伟建筑变为一团混乱粒子，这些粒子横冲直撞的，我们无法从中看出任何明显的规律。

2.如何描述无序运动？

但如果你因为热运动是无规则的，就认为没有任何物理语言能够描述这一现象，那就大错特错了。的确，热运动完全是不规则的，但同时，这一事实又使得它服从于一个新的规律——无序定律（law of disorder），或者更准确地说，是统计行为定律（law of statistical behavior）。为了理解这一描述，我们可以转向著名的“醉汉的脚步”的问题上。

假设我们正观察一位倚靠在广场中央的路灯旁的醉汉（没人知道他

是怎么到的这儿，或者什么时候到的），他突然决定随意走走，因此他开始出发，朝一个方向走了几步，又朝另一个方向走了几步，然后换方向继续，再继续，如此毫无规律地乱走，每走几步就改变一次方向（图80）。那么，在这个醉汉在弯弯折折地走了（比如说）100步之后，他距离路灯多远呢？你的第一反应可能“因为他每次转身都是不可预测的，所以这一问题不可能有答案”。但如果我们再聚精会神地想一想，就会发现，尽管我们确实不能说出醉汉走了100步后的具体位置，但我们却可以回答出他与路灯之间最有可能的距离。现在，我们就用严谨的数学方法来解答这一疑问。请以路灯为原点画两条相互垂直的坐标轴，X轴指向我们，Y轴指向右侧。设醉汉在转了N次方向后与路灯的距离为R（图80中，N＝14）。如果用X_N和Y_N表示第N段路程在对应坐标轴上的投影，根据毕达哥拉斯定理，显然可以得到：

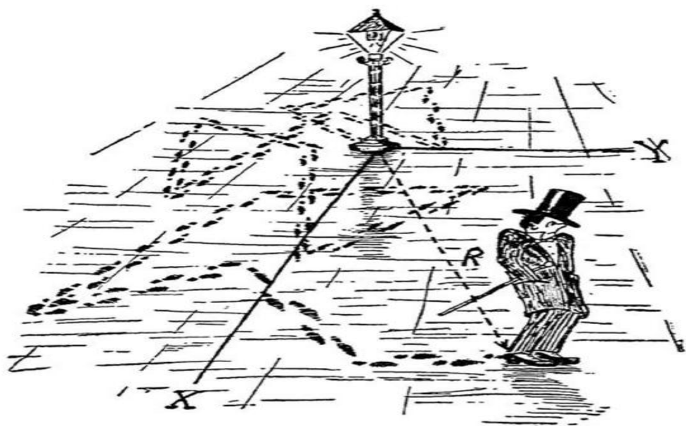


图 80

醉汉的脚步。

$$R^2=(X_1+X_2+X_3+\ldots+X_N)^2+(Y_1+Y_2+Y_3+\ldots+Y_N)^2$$

其中X和Y可取正值或负值，这取决于醉汉的行进方向是走近路灯还是远离路灯。

值得注意的是，因为醉汉的运动完全是无序的，所以X和Y取正值或负值的次数大约是相等的。我们现在根据代数的基本规则展开括号——即将括号内的每一项与其自身及其他项互乘。

因此有：

$(X_1+X_2+X_3+\ldots+XN)_2$

$=(X_1+X_2+X_3+\ldots+X_N)\times (X_1+X2+X_3+\ldots+X_N)$

$=X_1{}^2+X_1X_2+X_1X_3+\ldots+X_2{}^2+X_1X_2+\ldots+X_N{}^2$

这一长串加和包含了所有X的平方（$X_1{}^2$，$X_2{}^2\ldots X_N{}^2$）和所谓的“混合积”，如X1X2、X2X3等。

到目前为止，我们所做的还都是简单的数学运算，但接下来我们就要开始从统计学的角度来考虑醉汉脚步的无序性了。因为醉汉几乎完全是在随机运动，他走向路灯的可能性和远离的可能性是一样的，因此X的取值应该是一半正、一半负。所以，在这些“混合积”中，你应该总能找到数值相同但符号相反，可以互相抵消的一对，并且醉汉转变方向的次数越多，这种相互补偿发生的可能性就越大。最后，算式中留下的就只有X的平方，它们永远是正的。因此上式就可以写成：$X_1{}^2+X_2{}^2+\ldots+X_N{}^2=N_X{}^2$，其中，X是所有路径在X轴上投影的平均长度。

同理，第二个括号也可以化简为NY^2的形式，其中Y是所有路径在Y轴上投影的平均长度。这里我们必须再度声明，我们刚刚所做的不是严格意义上的代数计算，而是基于统计学的观点，鉴于路径的随机性而将“混合积”相互抵消后的结果，因而醉汉与路灯之间最有可能的距离现在可以化简为：

$R^2=N\cdot(X^2+Y^2)$

或

$R=\sqrt{N}\cdot\sqrt{X^2+Y^2}$

又由于平均路程在各个轴上的投影都成45°夹角，因而$\sqrt{X^2+Y^2}$（依旧是根据毕达哥拉斯定理）就可以简单看成是所有路程的平均长度。我们将该平均长度取值为1，于是得到：

$$R = 1 \cdot \sqrt{N}$$

通俗地说，我们的结果意味着：醉汉在无规律地改变足够多次方向之后，他与路灯之间最有可能的距离，等于每一次走过的路程的平均长度乘以改变方向的次数的平方根。

因此，如果醉汉每走1码（约等于0.9米）就改变一次方向（当然角度是无法预测的！），那么他在总共走了长达100码的路程之后，与路灯之间最有可能的距离仍旧只有10码。如果他一次都没有改变过方向，就直直地走，那么他就会距离路灯100码——这说明走路的时候，保持头脑清醒能够占到很大便宜。

上述例子完全是依据统计学进行的计算，所以我们说“这是醉汉与路灯之间最有可能的距离”，而不是每一个独立情况中的准确距离。在独立事件中，醉汉也有可能沿着直线远离路灯，尽管这个可能性不大。或者，他也有可能每次转向都是180°，因而每转两次就会重新回到路灯旁边。但如果有大量醉汉从同一个路灯开始，沿着不同的路径弯弯折折地走，并且互不干扰，你就会发现，在足够长的时间之后，他们会分散在路灯周围特定的范围内，而他们与路灯间的平均距离就可以用上述规律计算。图81给出了这种不规则运动的分布图，图中我们只画出了六个醉汉。当然，醉汉的数量越多，他们无规则转向的次数越多，这条规律也就越准确。

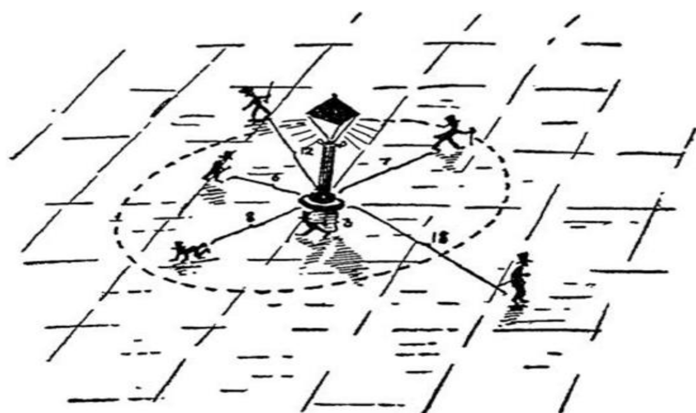


图 81

六个醉汉在一盏路灯周围走动的统计学分布。

现在，我们将醉汉替换成一些微小个体，例如植物花粉或悬浮在液体中的细菌，你会看到和生物学家布朗在他的显微镜下看到的完全一样的图景。当然，花粉和细菌不会喝醉，但我们在上文提到过，它们被周围进行热运动的分子不断地踢来踢去，从而被迫做着无规则运动，如同在酒精的作用下失去方向感的人类一样。

你在透过显微镜观察悬浮在水滴中的数量更多的微小粒子的布朗运动时，可以将注意力集中于其中的某一片很小的范围内（在路灯附近）。你会注意到，随着时间的流逝，它们会在视野内逐渐分散开，而它们与原始位置的平均距离，恰好与时间的平方根成正比，正如我们计算的醉汉与路灯的距离所遵循的数学定理一样。

同样的运动定理自然也适用于水滴中的每个独立分子，只是你无法看到它们，即使你能看到，你也无法分辨它们。为了让这种运动肉眼可见，我们必须使用两种分子，通过某种方法（如根据颜色）区分它们。我们可以在试管中装上半管呈鲜艳紫色的高锰酸钾水溶液，然后在上面加上一些清水，要小心操作，确保二者不会混合。我们会注意到清水逐渐染上了颜色，如果你等上足够长的时间，你会发现，试管中从上到下的全部液体都着上了均匀的颜色（图82）。这一过程你我都很熟悉，叫作扩散，它是高锰酸钾的染料分子在水分子间做无规则热运动导致的。我们必须把每个高锰酸钾分子都想象成一个袖珍的醉汉，它们被周围的分子不断地撞来撞去，一方面，在水中，分子的堆积相对紧密（与气体相比），所以每个分子在两次连续的碰撞间的平均路程很短，只有1英寸的一亿分之一；另一方面，室温环境下的分子会以大约0.1英里每秒的速度运动，所以分子每次撞击的间隔就只有一万亿分之一秒。

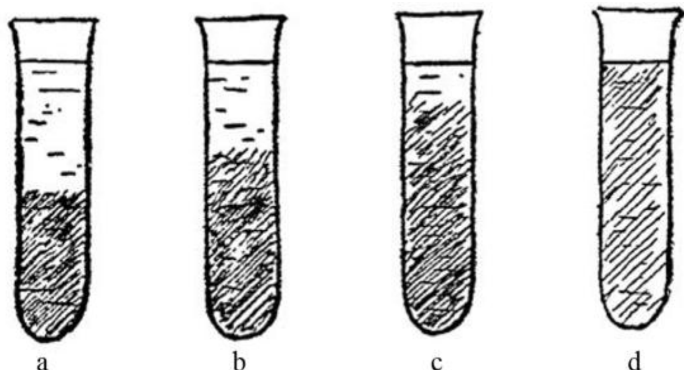


图 82

因此，在仅仅1秒之内，每个高锰酸钾的染料分子就会受到大约一万亿次连续的撞击，也会改变一万亿次运动方向。第1秒内，分子的平均距离将会是一亿分之一英寸（自由运动路程的长度）乘以一万亿的平方根，得到的平均扩散速率只有百分之一英寸每秒，这一进程可以说是非常慢了。同样情况下，一个没有受到任何碰撞的分子已经跑到了0.1英里之外了！如果你等上100秒，分子跋涉的距离将会是刚才的10倍（$\sqrt{N}$＝10）。而10 000秒后，也就是大约3小时后，分子的扩散程度将会是刚才的100倍（$\sqrt{10\ 000}$＝100），也就是1英寸远。

是的，扩散是很缓慢的过程，当你往一杯茶中放进一勺糖时，你一定更愿意把它们搅开，而不是等着糖分子自己在水中扩散开。

现在，我们来说说扩散过程的另一个例子，这也是分子物理中最重要的过程之一。让我们来设想一下，当把铁质烧火棍的一端插进火堆之后，热量在其中传播的方式吧。你自身的经验告诉你，等到烧火棍的另一端烫到用手拿不住的时候，需要很长的时间，但你可能不知道的是，热量是通过金属棍中电子的扩散而传递的。是的，普通的铁质烧火棍中其实也充满了电子，其他所有的金属物体也一样。金属与其他物质（如玻璃）之间的区别在于，前者的原子会丧失掉一部分外层电子，这些电子会在金属晶格间游荡，参与到不规则的热运动中去，就像普通气体中的粒子一样。

金属的外表面会对电子施加作用力，防止它们逃离金属，[5]但它们在金属内部的运动几乎是完全自由的。如果在金属线上施加电场力，这些自由电子就会朝向施力的方向运动，产生电流。从另一个角度来说，非金属通常是良好的绝缘体，因为它们的电子都被原子束缚着，不能自由运动。

当把金属棍的一端放进火焰中时，金属这一部分的电子的热运动将会显著增强，快速运动的电子开始向其他区域扩散，并携带着额外的热能。这一过程与染料分子在水中的扩散十分相似，不同的是，染料分子的例子中有两种不同的粒子（水分子和染料分子），而这里只是热电子气向冷电子气领域的扩散。不过在这个例子中，“醉汉的脚步”的定律依然适用，热量在金属棒中传递的距离，同样与对应时间的平方根成正比。

关于扩散，我们最后举一个完全不同的例子，一个关于宇宙的例子。在之后的章节中我们将了解到，我们的太阳的能量是由其内核深处的化学元素的核反应产生的，这些能量以高能射线的形式释放“光的粒子”，或光量子，进而开始了它们从核心到太阳表面的长途跋涉。因为光速是300 000千米/秒，太阳的半径只有700 000千米，因此，如果光量子不受任何干扰以直线前进的话，只需2秒多就能到达太阳表面。然而这与实际情况大相径庭，在向上爬升的路上，光量子会遭遇构成太阳的数不尽的原子和电子的撞击。光量子在太阳物质中自由运动的路程大约是1厘米（这要比分子自由运动的路程长多了），而且因为太阳的半径是70 000 000 000厘米，我们的光量子必须走过（7×10^{10}）^{2}或5×10^{21}段“醉汉的脚步”一样的路程，才能最终抵达太阳表面。又因为，每段路程所需的时间为$\frac{1}{3\times10^{10}}$或3×10^{-11}秒，所以整个旅程所需的全部时间就是$3\times10^{-11}\times5\times10^{21}=1.5\times10^{11}$秒，或大约是5 000年！[6]至此，我们再一次看到了扩散的过程是多么的缓慢。光从太阳的核心到太阳表面需要50个世纪之久，然而在空阔的行星际空间中，光沿直线从太阳传播到地球只需8分钟！

3.计算概率

上文的扩散过程只是我们将概率统计学定律应用于分子运动的一个简单例子。下面我们将进行更深层次的讨论，尝试理解最为关键的统领一切物质——无论是小水滴还是群星璀璨的整个宇宙——的热行为的熵增定律，在此之前，我们必须先学习一点计算简单或复杂事件中的概率的方法。

你能遇到的最简单的概率计算问题就是抛硬币问题。众所周知，在这个过程中（不作弊的情况下），我们得到正面和反面的可能性是相同的。我们总说正反面出现的情况是五五开，但在数学中通常说，正面和反面出现的概率各为$\frac{1}{2}$。如果你将正反面出现的可能性相加，结果就是$\frac{1}{2}+\frac{1}{2}=1$。在概率理论中，整数1意味着“必然”——你抛出一枚硬币后一定会得到正面或反面，除非它滚到沙发底下，毫无痕迹地消失了。

假如你连续抛出两枚硬币，或者同时抛两枚硬币——这两种做法其实是同样的意思，那么你很容易就知道，会出现图83中显示的四种可能情况。

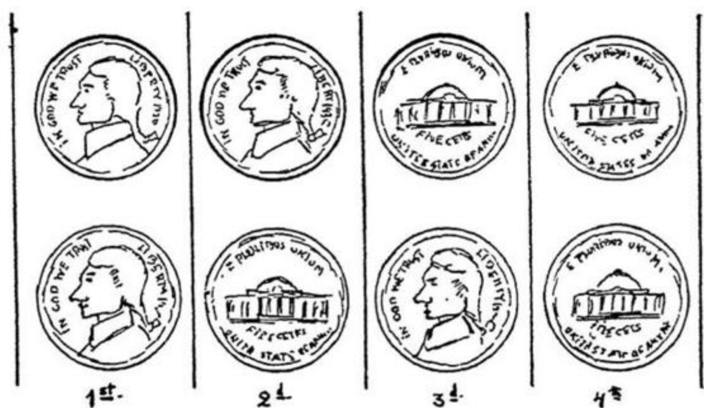


图 83

抛两枚硬币的四种可能组合。

第一种情况是得到两次正面，最后一种是两次反面，中间的两种得到的结果一样，因为你无须考虑正面或反面出现的先后顺序（或具体是

哪一枚）。因此你会说，得到两次正面的可能性是四种之一，或$\frac{1}{4}$，两次反面的可能性也是$\frac{1}{4}$，而出现一正一反的可能性是四种中的两种，也就是$\frac{1}{2}$。此时又是$\frac{1}{4}+\frac{1}{4}+\frac{1}{2}=1$，这意味着你能得到的可能的组合只有这3种。现在我们来看看抛三次的情况，下表总结了可能出现的8种情况：

三次抛硬币出现的**8**种情况

[illegible]	一次抛掷
[illegible]	二次抛掷
[illegible]	三次抛掷
[illegible]	

从这张表中可以看出，抛三次硬币得到全部是正面或全部是反面的概率都是$\frac{1}{8}$。其余的可能性包括二正一反和一正二反，概率都是$\frac{3}{8}$。

随着投掷次数的增加，这张表中可能出现的情况也在快速增加，不过我们还是可以再看看抛四次的结果，共有16种可能：

四次抛硬币出现的**16**种情况

[illegible]	第一次抛掷
[illegible]	第二次抛掷
[illegible]	第三次抛掷
[illegible]	第四次抛掷
[illegible]	

此时四次全部是正面或全部是反面的概率是$\frac{1}{16}$，一正三反或三正一反的概率都是$\frac{4}{16}$或$\frac{1}{4}$，而二正二反的概率是$\frac{6}{16}$或$\frac{3}{8}$。

如果继续投掷更多次硬币，你会得到很多种可能性，多到超出你所用的纸面的范围。例如，投掷十次硬币，你就会得到1 024种不同的可

能性（即2×2×2×2×2×2×2×2×2×2）。但你大可不必构建如此长的可能性表，因为你可以通过观察我们已经列出的简单例子，找出概率的简便定律，并且将其直接应用于更复杂的情形中。

在投掷两次硬币的例子中，你会发现，得到两次正面的概率等于两次得到一次正面的概率的乘积，即$\frac{1}{4}=\frac{1}{2}\times\frac{1}{2}$。同样的，在接下来的例子中，得到三次或四次正面的概率，也分别是每一次得到正面的概率的乘积（$\frac{1}{8}=\frac{1}{2}\times\frac{1}{2}\times\frac{1}{2}$，$\frac{1}{16}=\frac{1}{2}\times\frac{1}{2}\times\frac{1}{2}\times\frac{1}{2}$）。因此，如果有人问你抛十次硬币全部得到正面的可能性有多大时，你可以通过10个$\frac{1}{2}$相乘很快给出答案。答案是0.00098，说明出现这种情况的可能性实际上非常低——大约1　000次中才有可能出现一次！这里我们有一个“概率乘法”的规则，具体来说就是，如果你想得到几样不同的东西，那么你可以通过计算得到其中每一样东西的概率的乘积，从而求出得到所有东西的概率。如果你想要的东西有很多，而其中的每一样都不是那么有可能得到的话，那么你全部得到的可能性就会低得令人沮丧！

这里还有另一条规则——“概率加法”。具体来说就是，如果你只想要某些东西中的一样（前提是哪一个都行），那么你得到它的概率就是得到其中每一样东西的概率的和。

用抛两次硬币出现正反各一次的例子可以轻松解释这一规则：在这种情况下，你想要的其实就是“先正后反”或者“先反后正”中的任意一种。上述两种组合的概率都是$\frac{1}{4}$，因而得到其中任意一种的概率就是$\frac{1}{4}$加$\frac{1}{4}$，即$\frac{1}{2}$。总的来说，如果你想要“这个、这个和这个……”，你就需要将单独得到每个物件的概率相乘。但如果你想要的只是“这个，或这个，或者这个……”，你需要做的就是将单独得到每个物件的概率相加。

在前一种情况中，随着你想要的物件的增加，你得到所有物件的可能性会下降；在后一种情况中，当你只想要一堆物件中的任意一件时，随着可选物件的增加，你得到其中之一的可能性也会令人满意地升高。

抛硬币的实验就是所谓的“尝试的次数越多，概率定律越准确”的典例。图84描绘了抛掷2次、3次、4次、10次和100次硬币后，分别得到正面和反面的相对次数的概率图。你会发现，随着抛掷次数的增加，概率曲线会愈发陡峭，并且正反面五五开的趋势也会愈发凸显出来。

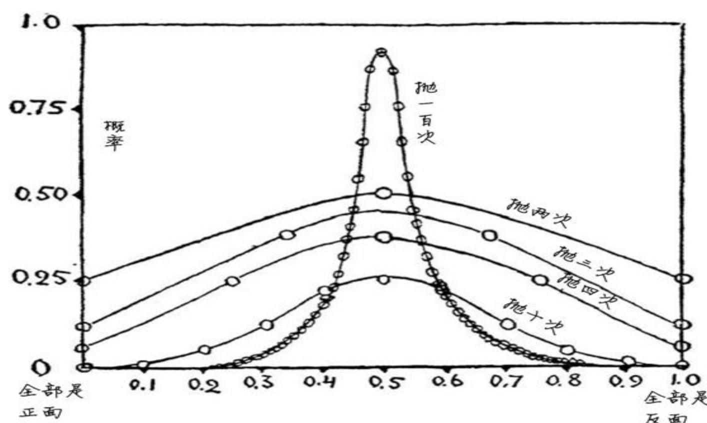


图 84

出现正面和出现反面的相对次数。

从图中可以看出，在抛掷2次、3次甚至4次硬币时，全部得到正面或反面的可能性比较大。但当抛掷10次时，哪怕只有9次出现正面或反面的可能性都非常小。如果抛掷更多次数，比如100次、1 000次，概率曲线就会变得如针般尖锐，你几乎不会得到五五开以外的可能性。

现在请让我们用刚刚学到的简单的概率计算规则，来判断在一种有名的扑克游戏中，5张手牌出现各种组合的概率。

或许你还不知道这个游戏，简单来说，就是每位玩家各摸5张牌，牌型组合最好的那位就是赢家。这里我们略去了为得到更好的组合而与对手换牌的复杂情况，以及为了让对手相信你的牌比你实际拥有的更好而采取的虚张声势的心理战术——尽管这种“虚张声势”才是游戏的核心玩法，而且丹麦著名物理学家玻尔还曾提出一种全新的游戏形式，不借助任何纸牌，玩家全靠假想出牌型组合来向对方虚张声势。当然这已经完全超出了概率计算的能力范围，完全是心理学上的问题了。

为了巩固刚才提到的概率计算规则，我们先来练习算出纸牌游戏中一些组合出现的概率。其中有一种组合叫作“同花”，即5张牌都是同一

种花色（图85）。



图　85

同花（同为黑桃）。

想得到同花，你抽到的第一张牌的花色其实是无所谓的，你只需要计算剩下4张仍是同一花色的可能性。一副牌中总共有52张牌，每种花色各13张，[7]因此，在你摸到第一张牌后，同花色的牌在牌堆中还剩下12张，此时下一张牌是同花色的可能性是$\frac{12}{51}$。类似的，第三张、第四张和第五张牌是同花色的可能性分别为：$\frac{11}{50}$、$\frac{10}{49}$和$\frac{9}{48}$。

因为你的要求是“5张牌都是同一种花色”，因此，此时应该用概率乘法的规则。通过计算你会发现，得到同花的概率是：

$$\frac{12}{51}\times\frac{11}{50}\times\frac{10}{49}\times\frac{9}{48}=\frac{13\ 068}{5\ 999\ 760}\text{，或约}\frac{1}{500}$$

但不要认为只要摸500手牌你就一定会得到同花。实际上你可能一手也得不到，或者也有可能得到两手。我们这里做的只是概率计算，而在真实情况下，你可能在摸过500手之后还没得到想要的组合；反之，你在第一次摸牌时就得到了同花。概率理论能告诉你的只是：在你摸500手牌中，可能会有一手同花。以同样的方式计算，你还会知道，每玩30 000 000次游戏，你有可能得到10次5张A（包括王牌）的情况。

另一种组合在扑克游戏中更加稀有，因而也更有价值，就是所谓

的“满堂红”。满堂红其实也就是我们常说的“三带二”（指其中2张牌牌面相同花色不同，另外3张牌也如此——如图86中2个5和3个Q的例子）。



图 86

满堂红。

如果你想得到满堂红，最初的两张牌是什么同样是无关紧要的，但在这之后，你需要补齐“3张”中的另2张，和“2张”中的另一张。此时有6张牌可以配齐你的牌面（如果你有1张Q和1张5，就还有另外3张Q和3张5），那么第三张牌能满足你要求的可能性就是$\frac{6}{50}$；第四张是$\frac{5}{49}$，因为此时牌堆中只剩49张牌，其中5张是你需要的，最终第五张的概率是$\frac{4}{48}$。因此摸到满堂红的总概率是：

$$\frac{6}{50}\times\frac{5}{49}\times\frac{4}{48}=\frac{120}{117\ 600}$$

或者说，大约是得到同花的概率的一半。[8]

以此类推，我们还能计算出其他组合出现的概率，如“顺子”（牌面连续递增的序列），同时还能进一步考虑引入可以变为任意普通牌的“大小王”之后概率的变化。

通过这样的计算可以看出，一副牌的好坏是由它的数学概率决定的。作者也不知晓，这是某位古代数学家提出的规则，还是全球数百万玩家，在或豪华或破烂的赌厅中，以损失金钱为代价，纯粹依靠经验得

出的规律。如果是后者，我们不得不承认，人类对于复杂事件的相对概率，做过非常好的统计学研究！

还有一个有关概率计算的有趣例子，这个例子同样也会有出人意料的结果，就是“同日出生”问题。试着回忆一下，你是否有过在同一天被邀请去两位不同朋友的生日派对的经历。你可能会说自己同一天收到两份邀请的可能性很小，因为你只有24个会邀请你的朋友，而一年有365天，他们的生日可能是其中的任意一天。有这么多可选的日期，所以在你的24个朋友中，有两个在同一天邀请你去切生日蛋糕的可能性极小。

然而，你的判断大错特错，尽管这听上去令人难以置信。真相是：24个人中，出现一对同一天生日的可能性相当高，甚至可能会有好几对！事实上，有人碰巧是同一天生日的可能性要比所有人生日都不同的可能性更大。

想要证实这一点，你可以做一张24个人的生日表，或用更简单的方法，直接在《美国名人录》这样的参考书中任意点出24个人，比较他们的生日。当然，我们也可以使用前文抛硬币和扑克游戏的问题中已经充分熟悉的概率计算，来得到所要求的概率。

首先我们来计算24个人中每个人的生日都不一样的可能性。我们先来“问”第一个人的生日，显然这可能是一年365天中的任意一天。那么第二个人的生日与第一个人不同的可能性有多大呢？因为第二个人也有可能出生在一年中的任何一天，而两人生日相同的可能只有一天，因而二人生日不同的概率是 $\frac{364}{365}$。类似的，第三个人的生日与前两人皆不相同的概率是 $\frac{363}{365}$，因为需要排除2天。接下来每个人的生日都与前面所有人不同的概率分别是：$\frac{362}{365}$，$\frac{361}{365}$，$\frac{360}{365}$，等等，直到最后一人是 $\frac{(365-23)}{365}$，即 $\frac{342}{365}$。

我们已经知道，这些独立概率全部发生的情况是将每个概率相乘，因而有：

$$\frac{364}{365}\times\frac{363}{365}\times\frac{362}{365}\times\ldots\times\frac{342}{365}$$

用高等数学的方法可以在几分钟内计算出乘积，但如果你不知道方法的话，你也可以用直接相乘的困难办法，[9]也不会花上太多的时间。最后的结果是0.46，这表明所有人的生日都不同的概率略小于$\frac{1}{2}$。换句话说，如果你有24个朋友，那么他们的生日完全不同的概率只有46%，相同的却有54%的可能，他们中有两个或两个以上的人的生日是同一天。因此，如果你有25个朋友或者更多，而你从未有过同一天被邀请去两个不同人的生日派对的经历，那么极大的可能是，要么你的朋友根本没有组织生日派对，要么他们没有邀请你！

“同日出生”问题是一个典例，它表明我们对复杂事件相关概率的常规判断，也有可能完全是错误的。作者已经问过很多人这个问题，包括一些主流科学家，但对方都以2：1甚至15：1的赔率打赌，同日出生的情况不会发生，只有一个人例外[10]。如果作者真的同这些人打了赌的话，那他一定会变成一个大富翁！

有一点需要再一次强调，根据上面给出的规则，我们可以计算出各种事件发生的可能性，以及其中最有可能发生的情况，但这并不意味着那些事件就一定会发生。即使我们进行上千次、上万次甚至上亿次实验，预测出的结果也只是“很有可能”，而不是“一定”。在实验次数较少的情况下，概率定律就不那么奏效了，比如对于篇幅很短的代码或密文，我们就无法用统计分析的方法进行破译。举个例子，我们来研究一下埃德加·爱伦·坡（Edgar Allan Poe）在他著名的故事《金甲虫》中描述的一个事例。故事中有一位勒格朗先生，一天，他在南卡罗来纳州的某片荒凉海滩溜达时，捡到一张半埋在湿沙中的羊皮纸。当他在他的沙滩小屋中享受火焰带来的温暖时，羊皮纸却在火焰的烘烤下变得通红，清晰地显现出了原本看不见的一系列神秘符号。其中有一个骷髅标志，说明这些内容是一位海盗所写；还有一只山羊头，进一步证明了这张山羊皮一定是著名的基德船长的笔记。上面记录了几行符号，显然是在指示一处秘密宝藏的位置（图87）。

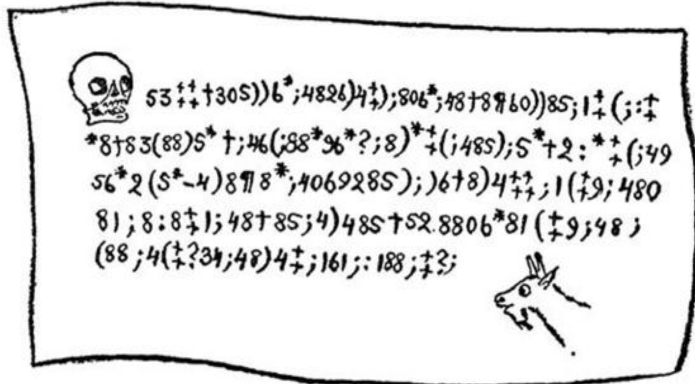


图 87

基德船长的信息。

我们暂且尊重埃德加·爱伦·坡的权威性，假定17世纪的海盗已经熟知分号、引号以及诸如‡、+、¶等其他符号。

对金钱的渴求驱使勒格朗先生用尽他全部的脑力来尝试破译这个神秘的密文，并最终通过英语中不同字母出现的相对频率成功破解。他的方法基于一个事实：如果你数一下任意一份英语文本中每个字母出现的次数，无论是莎士比亚的十四行歌剧还是埃德加·华莱士（Edgar Wallace）的悬疑小说，你会发现，字母“e”出现的频率最高。除“e”以外，其他字母出现的频率由高到低分别是：

a，o，i，d，h，n，r，s，t，u，y，c，f，g，l，m，w，b，k，p，q，x，z。

勒格朗先生数了一下基德船长的密文中各个符号出现的次数，发现出现最频繁的符号是数字8。“啊哈，”他说：“这就说明8最有可能对应字母e。”

好吧，在这个故事里他猜对了，但显然，8只是“很有可能”对应e，而不是“肯定是”。

事实上，如果这段密文的内容是“你会在伯德岛北端的旧屋子以南2 000码的树林中找到一个装满金子和钱币的铁盒子（You will find a lot

of gold and coins in an iron box in woods two thousand yards south from an old hut on Bird Island’s north tip）”的话，它不包含有任何“e”！但概率定律偏爱了勒格朗先生，他的猜测真的是正确的。

第一步获得成功后，勒格朗先生开始过分自信，他继续将字母和符号按出现概率和出现次数一一对应。下表给出了基德船长的信息中所有符号出现的相对次数。

基德船长密文字符出现次数排序

符号8出现了33次		e	e
;	26	a	t
4	19	o	h
‡	16	i	o
(	16	d	r
*	13	h	n
5	12	n	a
6	11	r	i
†	8	s	d
1	8	t	
0	6	u	
g	5	y	
2	5	c	
i	4		
3	4	g	g
?	3	l	u
¶	2	m	
-	1	w	
.	1	b	

第二列是按照出现的相对频率排列的英文字母。由此，我们自然可以假设第一列中列出的符号与第二列中的字母是一一对应的。然而，基于这种对应关系解码出来的基德船长的信息，我们发现其开头是：ngiisgunddrhaoecr…

这串字母毫无意义！

发生了什么？难道是这位老海盗诡计多端，使用了不符合普通的英语语言中字母频率规律的特殊单词？当然不是，这仅仅是因为，这段信息的长度还不足以满足理想的统计抽样条件，其中字母的出现频率并不完全符合概率分布。若是基德船长用一种极其精妙的方法藏起了宝藏，指示其位置的信息占据了好几页的篇幅，或干脆像一册指南那么厚，那么勒格朗先生使用频率规则解开谜团的可能性就大得多了。

倘若你抛100次硬币，你会清楚地知道出现正面的次数可能是50

次；但倘若你只抛4次硬币，那么你很可能只会得到三正一反，或者反过来，一正三反。实验的次数越多，得到的结果也就越符合概率定律。

由于密文中的符号数量不足，统计分析这种简便方法失败了，于是勒格朗先生只好使用另一种方法——基于英语中不同单词的详细结构的分析手段。首先他进一步确认了符号8对应字母e的假设，因为他观察到，“88”这一组合在这段信息中出现得很频繁（5次），而众所周知，英语单词中“ee”也是最经常出现的[如meet（ 相见），fleet （舰队），speed （速度），seen（看见），been（豌豆），agree（同意）等]。此外，若8真的对应e，那么我们应该能多次看到它作为单词“the”的组成部分而出现。在检视密文后我们发现，“；48”这一组合出现的频率排在了第二位。如果“；48”就代表“the”的话，那我们就可以得出结论：“;”对应t，“4”对应h。

推荐读者亲自去阅读一下埃德加·爱伦·坡的原文，以详细了解破译基德船长信息的过程。总之，最后我们得到的完整文本是：

“主教旅舍的恶魔坐像上有面绝好的镜子。北偏东41度13分。主干东侧的第七根树枝。从骷髅头的左眼开枪。从那棵树开始沿子弹方向走50英尺。”（A good glass in the bishop’s hostel in the devil’s seat. Forty-one degrees and thirteen minutes northeast by north. Main branch seventh limb east side. Shoot from the left eye of the death’s head. A bee-line from the tree through the shot fifty feet out.）

219页的表格的最后一列呈现了勒格朗先生破译出的符号和字母的正确对应关系。你会发现，它们并非完全符合概率定律分布。显然，由于文本太短，概率定律在这个例子中没能发挥作用。不过，即使是在这种小的“统计抽样”中，我们还是能注意到，字母会倾向于按照概率理论的顺序排列，如果信息的篇幅足够长的话，这种趋势将很难被打破。

通过大量的实验检验概率理论规则的例子似乎只有一个（其实还有另一个事实：保险公司永远不会破产），那就是著名的“星条旗和火柴”的问题。

为了进行这个特别的概率问题实验，你需要一面美国国旗，准确来

说，是需要上面红白条纹的那部分。如果找不到这样的旗子，就找一大张纸，在上面画上一系列等距的平行线。然后你还需要一盒火柴——随便哪种都行，只要它们短于条纹的宽度就行。此外你还需要希腊字母“派”，当然不是吃的那个派，而是希腊字母表中的“π”，它对应的英语字母是“p”。这个字母还表示圆的周长与直径的比率。你应该知道，它在数值上等于3.141 592 653 5...（它实际上是无限的，但我们不必全部用上）。

现在，将旗子展开在桌子上，抛出一根火柴，看着它落到旗子上（图88）。它可能会落在一道条纹的中间，也可能会压在两道条纹的交界线上，那么，这两种情况发生的可能性各有多大呢？

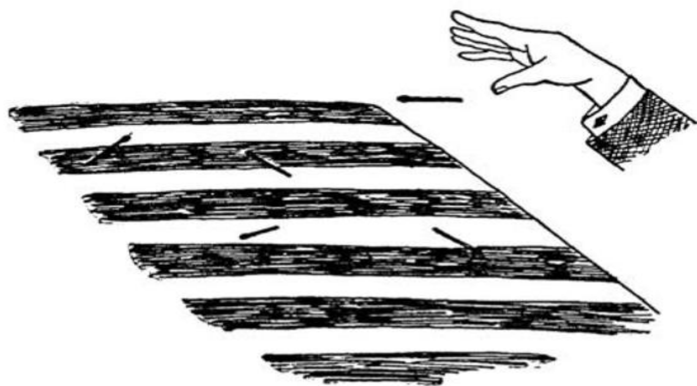


图 88

根据我们探寻其他事件的可能性的步骤，我们首先必须弄清楚所有可能出现的情况。

然而你很清楚，火柴落在旗子上的方式有无限多种，你又怎么能全部罗列出来呢？

我们再更细致地分析一下这个问题。火柴掉落的地方与条纹的相对位置关系，可以利用火柴中点与临近的边界线的距离及火柴与条纹的夹角来描述，如图89。图中给出了三个典型的例子，为了简化说明，我们假设火柴的长度等于条纹的宽度，比方说都是2英寸。如果火柴中心离边界线很近，与边界线的夹角也足够大的话（a情况），火柴就会横跨边界线；反之，如果火柴与边界线的夹角较小（b情况）或距离较大（c

情况），火柴就会完全落在一道条纹线内部。更确切地说，如果火柴的一半在竖直方向上的投影大于条纹宽度的一半的话（a情况），火柴就会横跨边界；反之（b情况）则不会横跨。上面的表述可以用图89下方的图像来表示：横轴以弧度为单位，表示火柴与边界的夹角；纵轴表示火柴的一半在竖直方向投影的长度，在三角函数中，与给定弧度对应的这一长度就是正弦。显然，弧度为零的时候，正弦的值也为零，因为此时火柴处于水平方向。当弧度为 $\frac{\pi}{2}$ 时，对应的夹角为直角[11]，此时正弦值等于1，因为火柴刚好为竖直方向，与其投影相重合。当弧度处于0和 $\frac{\pi}{2}$ 之间时，正弦的取值范围就是大家熟知的波形数学曲线——正弦曲线（图89中我们只给出了完整正弦曲线的四分之一，弧度的范围为0到 $\frac{\pi}{2}$ ）。

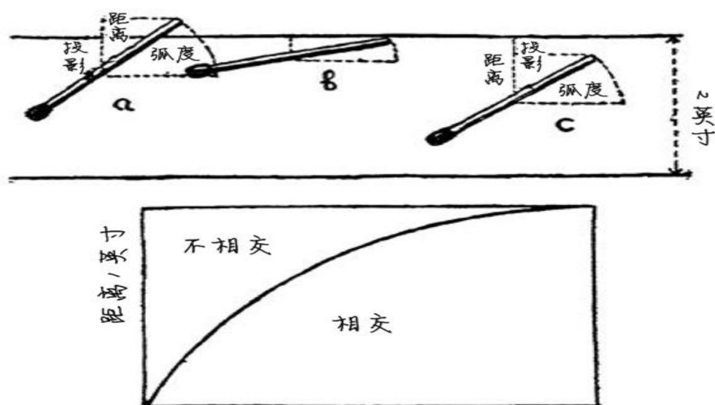


图 89

有了这种图形，我们就可以用它很方便地估计出火柴落在边界线上或落在条纹内部的可能性了。事实上，就像我们之前见到过的那样（再看一下图89上面的三个例子），当火柴的中心点与边界线的距离小于其对应的投影长度，也就是小于夹角对应的正弦值时，火柴就会与边界线相交。这种情况意味着，我们会在下方的图像中得到一个低于正弦曲线的点。相反，如果火柴完全落入条纹内部的话，我们就会得到高于正弦曲线的点。

因此，根据概率计算的规则，火柴与边界线是否相交的可能性的比

值，就等于正弦曲线以下的面积与正弦曲线上方的面积的比值，或者说，可以通过计算上下两块区域的面积占整个矩形面积的比例，求出这两种情况的概率。我们可以用数学方式证明（参见第二章），图像中正弦曲线以下的面积正好等于1。因为矩形的总面积是 $\frac{\pi}{2}\times 1=\frac{\pi}{2}$ ，所以我们发现，火柴与边界相交（在火柴长度与条纹宽度相等的情况下）的概率是 $\frac{1}{\pi/2}=\frac{2}{\pi}$ 。

此时π又蹦了出来。这一有趣的事实最早由18世纪的科学家布封（Count Buffon）发现，因而火柴与条纹的问题也叫布封问题。

一位勤奋的意大利数学家拉泽里尼（Lazzerini）对此问题进行过一次真实的实验，他共抛出了3 408根火柴，最后观察到，其中有2 169根与边界线相交。将这次实验记录的准确数据代入布封公式，即 $\frac{2}{\pi}=\frac{2\,169}{3\,408}$ ，解得π＝3.1415929，这一数值直到小数点后第七位才与实际上π的准确数值不同！

这自然是证明概率定律有效性的一个极有趣的例子，但也并不比抛硬币有趣多少——如果你抛掷上千次硬币，用抛掷的总次数除以正面朝上的次数，得到的结果也一定会是“2”。当然，你实际上算出的结果应该是2.000000…其中的误差就同拉泽里尼算出的“π”的误差一样小。

4.“诡秘”的熵

上文讨论的概率计算的例子，每一个都与日常生活相关。我们已经知道，当样本的数量较小时，这种预测会得到令人沮丧的结果；样本数量越大，预测的效果才会越好。因此，这一定律尤其适用于数量极大的原子和分子，因为即使是我们平时能用到的最小的物体，其中也包含着无穷多的原子或分子。尽管在“醉汉的脚步”的例子中，统计学定律只能告诉我们一个大概结果——毕竟在这个例子中只有六个醉汉，每个醉汉可能只转过24个方向，但如果将其应用到每秒钟会发生数十亿次碰撞的

几十亿个染色分子上，我们就能得到最严谨的扩散物理学定律。我们可以说，原本只溶解在试管里一半的水中的染料，之所以会倾向于通过扩散过程均匀散布到整个液体中，是因为这种均匀分布要比原先的情况出现的可能性更大。

基于同样的原因，当你在阅读这本书时，你所在的房间四面八方也均匀充斥着空气，从未发生过房间内的空气突然聚集在一个角落里，导致你窒息的情况。但是，从物理学角度来说，这种恐怖的情况并非完全不可能，只是发生的概率极低而已。

为了弄清楚这一问题，我们假设有一间被垂直平面分隔成两个相等部分的房间，然后问问自己，这两个部分之间的空气分子最有可能以什么状态分布。这个问题显然与前文讨论的抛硬币的问题相同，如果我们先考虑一个分子，那么它处在左半边和右半边的可能性是相等的，就像抛出的硬币掉到桌面后得到正面或反面的可能性一样。

第二个分子、第三个分子……其他所有的分子分布在房间的左边或右边的可能性也都是相等的，无论它们处于什么位置。[12]因此，分子在房间的两半边的分布问题，就等同于多次抛掷硬币得到正反面的次数的分布问题，如图84所示，五五开分布的可能性是最大的。我们从图中还能看出，随着抛掷次数（也就是这个例子中的空气分子数量）的上升，五五开的概率会越来越大；当样本基数足够大时，这一概率几乎就成了确定的情况。普通大小的房间中大约包括10^{27}个分子，[13]因此它们全部同时聚集在房间的一半（比如说右半边）的可能性为：

$$(\frac{1}{2})10^{27} \approx 10^{-3} \times 10^{26}$$

也就是$\frac{1}{10^{-3\times 10^{26}}}$。

另外，由于空气分子在以大约每秒0.5千米的速度运动，所以它从房间的一头运动到另一头仅需0.01秒，也就是说，它们在房间中的分布每秒就会重新排列100次。因此得到完全处于右边的组合所需的等待时间是10299 999 999 999 999 999 999 999 998秒，而宇宙从诞生开始，迄今为止也只存在了10^{17}秒！所以你完全可以镇定自若地继续阅读本

书，不用担心会有窒息的风险。

再举一个例子，现在我们来考虑放在桌上的一杯水。我们知道，参与无规则热运动的水分子会朝向任何可能的方向运动，但因为相互之间的内聚力，所以它们还不至于完全分散。

鉴于每个单独的分子的运动方向完全是由概率定律控制的，我们可以思考一下，在某一时刻，杯中一半的分子（比如说杯中上半部分的分子）都向上运动，而另一半的分子——杯中下半部分的分子——都向下运动的可能。[14]假设此时两组分子间分界面上的内聚力是作用于水平方向的，不再能阻止它们“分离的共同愿望”，这样一来我们就能观察到十分反常的物理现象了：杯子里上半部分的水会以子弹一样的速度自动射向天花板！

还有一种可能是，水分子热运动的能量都集中在了上半部分，此时杯子下半部分的水会瞬间结冰，而上半部分的水则会猛烈地沸腾。为什么你从没见过这些情况发生呢？这不是因为它们绝对不可能发生，而是因为它们发生的概率极小，“几乎不可能”发生。事实上，如果你试着计算出原本向各个方向随机运动的分子的突然发生上述情况的概率，你会发现，得到的数值和“空气分子聚集在房间的一角”的可能性一样小。同样的，由于水分子的相互碰撞，而导致“一些分子丧失绝大部分动能，而另一个则获得大量动能”的可能性也是微不足道的。因此，我们观察到的分子运动的实际情况，总是会按照其最有可能的状态进行。

如果我们从与“分子的位置或速度最有可能呈现的状态”相反的情况开始考虑，比如从房间的一角开始释放一些气体，或在冷水上面倒上一点热水，此时将会发生一系列物理转变，使得整个系统从低概率状态向高概率状态转换——气体会逐渐扩散，直到均匀分布在整个房间；杯子上层的热量会向下流动，直到整杯水都具有相同的温度。

因此我们可以说，所有依赖于分子无规则运动的物理过程都会朝向概率更大的方向发展，而平衡态，也就是什么都不会发生的情况，往往对应最大概率。我们从房间中的空气的例子可以看出，分子的分布概率通常是很不方便表达的极小数字（如空气都聚集在一半房间的概率是

$10^{-3 \times 10^{26}}$ ），我们通常会取对数来表示这一数值，这个对数的值就叫作熵，它在关于物质的无规则热运动的一切问题中，都扮演着主导角色。现在我们可以将前文描述物理过程中的概率变化的论述改写为：一个物理系统中的任何自发改变都是朝着熵增的方向发展，而最终的平衡态对应着最大的熵值。

这就是著名的熵定律，亦称为热力学第二定律（第一定律是能量守恒定律），你应该能看出，这条定律并没有什么可怕的。

熵定律也可以被称为无序递增定律，因为我们可以从上面所有的例子中看出，当熵值达到最大时，分子的位置和速度的分布都是处于完全随机的状态，因而任何想要在它们的运动中引入秩序的企图都会导致熵减。此外，我们可以从“将热量转变为机械运动”的问题中，推导出一个更具有实际意义的熵定律公式。你应该还记得，热量实际上就是分子的无规则机械运动，那么你就很容易理解，将给定物体中包含的热量转变为大规模运动的机械能，这与迫使物体中的所有分子朝向一个方向运动的操作是一个意思。然而在“杯中一半的水可能会自发射向天花板”的例子中，我们知道，这种现象发生的概率极低，几乎可以说是不可能的。因此，尽管机械运动的能量可以完全转变为热量（例如通过摩擦），但热能却不可能完全转变为机械运动。这一规则排除了所谓的“第二类永动机”存在的可能[15]——这种设想出来的机器可以从常温物体中提取热量，随后将其冷却，同时把获得的能量运用于机械工作上。因此你也不可能设计出这样一艘汽船：它不靠烧煤来提供动力，而是从海水中吸收热量从而产生蒸汽，最后再将因被抽走热量而冷却成冰块的“海水”扔回大海。

那么普通的蒸汽机是如何在不违背熵定律的情况下，将热量转化为运动的呢？关键在于，蒸汽机中只有一部分燃料燃烧释放出的热量转化为了能量，其余更大的一部分则与排放出去的蒸汽一同消散在了空气中，或者被特制的冷却设备吸收。在这个过程中，我们的系统遇到了熵的两种截然不同的变化：①一部分热量转变为活塞的机械能，对应熵减。②其余热量从锅炉进入到冷却设备中，对应熵增。熵定律只要求系统的总熵值提高，那么只要让第二部分大于第一部分就能轻易实现这一

点。我们可以用一个例子更好地说明这一情况：假设在高出地面6英尺的架子上放着一个5磅重的物体。根据能量守恒定律，物体显然不可能自发地升高，顶到天花板上。但从另一方面来说，它可以通过向地面甩下自身的一部分重量而得到能量，并利用这些能量让剩余部分升高。

同样的，我们可以让系统中的一部分发生熵减，只要同时另一部分的熵增足以补偿差值就可以。换句话说，对于一些无序运动的分子，你可以让其中的一部分变得有秩序起来，只要你不在意这么做会让另一部分的运动更加无序就好。而实际上，在所有的热功能机械中，我们都不会在意这一点。

5.统计涨落

前文中的讨论一定让你清晰地认识到了一个关于熵定律及其所有推论的事实：大尺度物理中的所有物质都是由极大数量的单个分子构成的，因此，任何基于概率考虑的推测都几乎是绝对确定的。但是当样本的数量过小时，这种推测的确定性就会大幅下降。

例如，如果我们不像上文的例子那样考虑充满大房间的空气，只选取极小体积的气体，比如边长为$\frac{1}{100}$微米[16]的立方体，那么情况就会变的大不相同了。事实上，因为该立方体的体积是10^{-18}立方厘米，所以其中只包含了$\frac{10^{-18}\times 10^{-3}}{3\times 10^{-23}}$＝30个分子，而它们会聚集在该立方体的一半范围内的可能性是$(\frac{1}{2})^{30}=10^{-10}$。

从另一方面来说，因为该立方体足够小，所以分子每秒会被打散5×10^9次（分子的运动速度是每秒0.5千米，而该立方体中的距离仅有10^{-6}厘米），因此我们每秒都有可能发现立方体中的一半是真空的。不用说，在该立方体中，有一小部分分子聚集在立方体的一端的情况会更频繁地发生。例如其中的20个分子挤在一端，而余下的10个分子挤在另一端（也就是说立方体其中一端只比另一端多出10个分子），这种情

况发生的概率是$(\frac{1}{2})^{10}\times 5\times 10^{10}=10^{-3}\times 5\times 10^{10}=5\times 10^{7}$，也就是每秒50 000 000次。

因此在小尺度下，空气中分子的分布将不再是均匀的。如果可以放大足够大的倍数，我们应当能注意到气体中的一些分子会不断地集中在某个位置，随后迅速分散，而同时其他位置也会出现这种集中现象。这一效应被称为密度涨落，它在许多物理现象中都扮演了重要角色。当阳光穿透大气层时，这种不均匀性就会造成光谱中蓝光的散射，为天空刷上我们熟悉的颜色，并使太阳看上去比实际更红。这种使太阳看起来更红的效应在日落时尤为明显，因为此时的大气层要更厚一些。正是由于这种密度涨落，天空才不会永远黑暗，而星星也无法在白天闪耀。

同样的，密度和压力的涨落也发生在普通的液体中，尽管强度较弱。所以描述布朗运动成因的另一种方式是：悬浮在水中的微小粒子之所以会被推来推去，是因为它们的两侧受到的压力总是迅速改变。当液体被加热直到接近沸点时，密度涨落才会变得更明显，从而使液体看起来略带乳白色。

现在我们不禁要问，在这些由统计涨落占据主导地位的小物体中，熵定律是否还适用呢？显然，即使是一个一生都在被周围的分子撞来撞去的细菌，它也会对热量不能转化为机械运动的说法嗤之以鼻！但在这种情况中，我们并非说熵定律失效了，更准确地说，是熵定律失去了实际意义。事实上，熵定律所描述的一切，都是分子运动不能被完全转化为包含无数分子的大型物体的运动这件事。而细菌的体积并不比分子大多少，所以对它们来说，热运动和机械运动之间几乎毫无区别。遭受分子碰撞对它们来说，就好像我们在激动的人群中被冲得东倒西歪一样。如果我们是细菌，那我们只需把自己绑在一个飞轮上就能造出第二类永动机，但此时我们已经没有大脑能够想到这件事了。因此，“我们不是细菌”这件事实际上也没什么好可惜的！

实际上，一个看似相悖于熵增定律的特例是生命体：生长中的植物吸取二氧化碳（从空气）和水（从地面）分子，然后将其组合成更复杂的有机分子，作为其自身的组成部分。简单分子向复杂分子的转化表明

熵在减少，而正常的与之对应的熵增情况应当是燃烧木头，将其分子分解为二氧化碳和水蒸气。那么植物是不是真的违背了熵定律呢？它们是不是借助了某种古代哲学家认为的神秘力量来帮助自身生长呢？

通过分析我们得出结论，这一过程并没有违背熵定律，因为除了二氧化碳、水和一些盐分之外，植物生长还需要充足的阳光。阳光中含有能量，这些能量被生长中的植物储存在自身的物质中，并在植物燃烧时再次被释放。除此之外，阳光中还有所谓的负熵（低熵），当阳光被绿叶吸收时，负熵也随之消失。因此，在植物叶片中发生的光合作用包含两个彼此关联的过程：①将阳光的光能转化为复杂的有机分子的化学能。②通过阳光中的负熵来降低简单分子转变为复杂分子这一过程的熵值。用“有序对抗无序”来类比就是：太阳辐射在被绿叶吸收时，其内部秩序也被打乱，而分子的排列却因此而变得更复杂、更有序。植物从阳光中获取负熵（秩序），利用无机成分构建自己的躯体，而动物则需要吃掉植物（或相互厮杀）来补充负熵，所以，动物是负熵的二手使用者。[17]

[1] 此处的“14K”原文为“14°abs”，即绝对零度之上14°。开尔文在1848年提出，从绝对零度开始取一种新的温标，以摄氏度作为单位增量，故原文如此表示。在作者写作本书时，尚未有明确的热力学温标定义，其符号K也是很久之后才获得确定，但因为定义相同，所以后文的“°abs”均用“K”替代，以后不再说明（译注）。

[2] 马克·吐温在《漫游外国记》中描述了一个有趣的故事：几个去阿尔卑斯山登高的人想测量一下山的高度。他们带了无液气压计，显然，他们既可以通过气压计的读数，也可以通过测量水沸腾时的温度计算出山的海拔。但他们记错了，他们把气压计放进了煮沸的水中，最终他们没有得到任何结果（译注）。

[3] 所有数值均是标准大气压下的情况。

[4] 参见第十一章。

[5] 当我们将一根金属丝加热到高温时，其中电子的热运动会变得

足够剧烈，其中的一部分会从表面逃离，这一现象被用于电子管。所有的业余无线电爱好者都熟知这一电子元件。

[6] 根据现在天文学家对太阳内部物质密度的推测，光在太阳内传播的时间大约为几十万年（译注）。

[7] 此处略去了"'大小王'可以作为百搭牌，替换成任何想要的牌"这一更复杂的情况。

[8] 事实上这里对于"满堂红"的计算是很不严谨的，因为作者忽略了一些情况，具体计算法还请读者自行尝试（译注）。

[9] 如果可以的话，请尽可能使用对数表或对数计算尺！

[10] 这一例外当然是一位匈牙利数学家（参见本书第一章的开头）。

[11] 半径为1的圆，其周长是直径的π倍，即2π。因此圆周长的四分之一是 $\frac{2\pi}{4}$ ，或 $\frac{\pi}{2}$ 。

[12] 事实上，由于气体中单个分子间的空隙较大，所以空间并非完全占满的，给定体积内的分子不会完全阻止新分子的进入。

[13] 一个长15英尺、宽10英尺、高9英尺的房间，体积是1 350立方英尺，或5×10^7立方厘米，房间内包含5×10^4克空气。因为空气分子的平均质量是30×1.66×10-24≈5×10-23克，因此房间中的总分子数是$\frac{5\times10^4}{5\times10^{-23}}$＝1027个。

[14] 我们必须考虑这种五五开的分布情况，因为从动量守恒定理的角度考虑，不可能出现所有分子都朝一个方向运动的情况。

[15] 如此称呼是因为还有"第一类永动机"，这种装置试图在不依靠任何能量来源的情况下工作，这违背了能量守恒定律。

[16] 1微米等于0.0001厘米，通常由希腊字母μ表示。

[17]　热力学中的负熵通常是指某些途径下的熵减，而在信息学中还有一种负熵，它指的是信息本身。不过广义来谈，负熵都是混乱向秩序的变化（译注）。

第九章 生命之谜

1.我们由细胞组成

在探讨物质的组成结构时，我们刻意忽视了一类相对来说数量较少但却极其重要的物体，它们与宇宙中一切的其他物体都有所不同，具有特殊的性质——它们是活的。那么生命物质和非生命物质的组成之间有什么重要区别呢？在利用基础物理定律成功解释了非生命物质的性质之后，我们再一次利用这些定律来理解生命现象又是否可行呢？

当我们说起生命现象时，我们通常会想到一些庞大且复杂的生命体，如一棵树、一匹马或一个人。但通过如此复杂的有机系统来尝试研究活物质的基本性质，注定会是一场徒劳，就如同试图借由汽车这样的复杂机械去研究无机物的性质一样。

这种研究方法的困难程度是显而易见的。我们知道，飞驰的汽车是由几千种处于各种物理状态的零件组合而成的，而这些零件又是由不同的材料制作的，且形状各异。其中一些（例如钢制车架、铜线和挡风玻璃）是固体，一些（例如散热器中的水、油箱中的汽油及气缸中的机油）是液体，还有一些（例如汽化器送入气缸的混合物）是气体。因此，研究这些组成汽车的复杂物件的第一步，是将其拆解为具有相同物理性质的独立部件。由此我们发现，这些零件都是由各种金属物质（例如钢、铜、铬等）、非晶体（例如玻璃和塑料）和各种均匀液体（例如水和汽油）等组成的。

现在我们可以进行下一步研究了。利用已知的物理学方法我们得知：铜质部件是由一个个微小的晶体组成的，而每个晶体又都是由铜原子一层层有规则地堆叠而成的；散热器中的水是由大量松散的水分子组成的，每个水分子都包含一个氧原子和两个氢原子；通过汽化器阀门进入气缸的混合气体是一群快速运动的氧气分子和氮气分子，其中还掺杂了汽油蒸汽分子，后者是由碳原子和氢原子组成的。

同样的，在分析复杂有机物（例如人体）时，我们也必须先将其拆

解为单独的器官，如大脑、心脏和胃，再进一步将这些器官拆解为各种生物性质均匀的材料，也就是我们通常所说的“组织”。

组织是构建复杂生命体的原料，所以从某种意义上说，生命体与由各种物理性质均匀的物质构成的机械设备是一样的。根据构建生命体的组织的性质来分析生物体功能的科学叫作解剖学和生理学，这两门科学在一定程度上可以类比于工程学，后者同样是根据构建各种机械物质的力学、电磁学和其他物理性质来研究机械的功能的。

因此，我们不可能只依靠观察组织是如何构成更复杂的机体的，就得出生命之谜的答案，而应该弄清楚组成每个生命体的器官究竟是由哪些原子组成的。

如果你认为生物性质均匀的活组织与普通的物理性质均匀的物质是差不多的，那就大错特错了。事实上，任意选取一些组织（无论是皮肤、肌肉还是脑组织）放在低倍显微镜下分析，我们都能看出它是由极大数量的独立单元组成的，这些单元的本质基本上决定了整个组织的性质（图90）。这种生命物质中的基本结构单元通常被称为“细胞”，也可以称之为“生物原子”（即“不可分割者”），因为保持给定组织的生物学特质的基本单位是细胞组。



图 90

各种细胞。

例如，当肌肉组织被切分到只有半个细胞大小时，它就会完全丧失肌肉收缩的性质。这就好像当一块镁只剩半个镁原子时，它就不再是金

属镁，而是一小块煤炭一样！[1]

构成组织的细胞的尺寸极小（经测量，其平均尺寸在0.01毫米左右[2]）。我们熟悉的任何植物或动物，都是由无穷多的细胞组成的，比方说，在成年人类的躯体中，就包含几百万亿个细胞！

更小的机体自然是由更少数量的细胞组成的，例如家蝇或蚂蚁，它们包含的细胞数量不超过几亿个。也存在一大类单细胞生物，如变形虫、真菌（例如那些造成皮癣感染的罪魁祸首）及各种细菌，都是只由一个细胞构成，并且只在高倍显微镜下才能看到。这些独立的活细胞在复杂生命体中究竟默默担当了什么样的“社会职责”？对这一问题的研究是当今生物学界最激动人心的篇章之一。

为了能大体理解生命之谜，我们必须从活细胞的结构和性质中寻求解答。

活细胞的几项基本特殊性质包含以下能力：①从周围的物质中汲取自身结构所需的成分。②将这些成分转化为供自身生长的物质。③当自身体积过大时，会分裂成两个相似的细胞，每个细胞都与原细胞一样大小，而且能够自行生长。显然，这些“进食”“生长”“繁殖”的能力也普遍存在于所有由多个细胞组成的更复杂的生命体中。

思维敏锐的读者可能会反对这一点，因为这些性质在普通的非生命物质中也能找到。例如，如果我们向一杯过饱和盐溶液中丢一小块盐晶体，[3]盐分子就会持续从水中析出（或者说“被踢出”），一层层附着在晶体表面。我们甚至能想象到，因为某些力学效应，例如晶体不断增加的重量，晶体在达到一定尺寸后会破裂成两半，而得到的“婴儿晶体”还会继续增大。那么，我们为什么不能将这一过程也定义为“生命过程”呢？

为了解答这个问题和其他类似的疑惑，我们必须首先声明，生命只不过是普通的物理现象和化学现象中更为复杂的一种情形，我们不应该将其明确区分开来看。就好像在使用统计学定律描述由大量分子构成的气体的行为时（参见第八章），我们也不能确定这种描述的明确界限。事实上，我们知道房间里的空气不会突然聚集在一个角落里——至少这

种不寻常事件发生的可能性小到可以忽略不计，另外，如果一个房间中只有2个、3个或4个分子，那么它们都聚集在一个角落里这件事也就不足为奇了。

可是，这两种情况发生的可能性在数量上的明确界限是多少呢？是一千个？一百万个？还是十亿个？

同样的，将这一问题类比到基本的生命过程中，我们也不能指望这种简单的分子行为——如盐在水溶液中结晶的现象——和本质相同但情况要复杂得多的活细胞的生长和分裂的现象之间有什么明确的界线。

但是在这个特殊的例子中，我们可以明确地说，晶体在溶液中的生长不能等同于生命现象，因为晶体为了生长而从溶液中吸取的“食物”，在进入晶体体内后不会发生任何变化。原本溶于水中的盐分子只是独立地聚集在晶体的表面，在这个过程中发生的只是物质的机械堆积，而非典型的生物化学上的吸收。同样，晶体的“繁殖”也只不过是由重力造成的偶然性的碎裂，分裂出的晶体不过是几块不规则的、不成比例的晶体碎块，与活细胞在内部作用力下精确而持续地分裂为两个相同部分的生物过程，没有任何可比性。

我们或许可以举一个更接近生物过程的例子，比如说，将单个乙醇分子（C_2H_5OH）放入二氧化碳气体的水溶液中（图91），如果该分子能够立刻开始自我合成，将水中的水分子和溶解气体中的二氧化碳分子结合，生成新的乙醇分子，[4]那么，只要把一滴威士忌滴进一杯普通的苏打水中，整杯苏打水就会完全转变为纯威士忌。如此一来，我们就不得不认为乙醇是活的物质了！

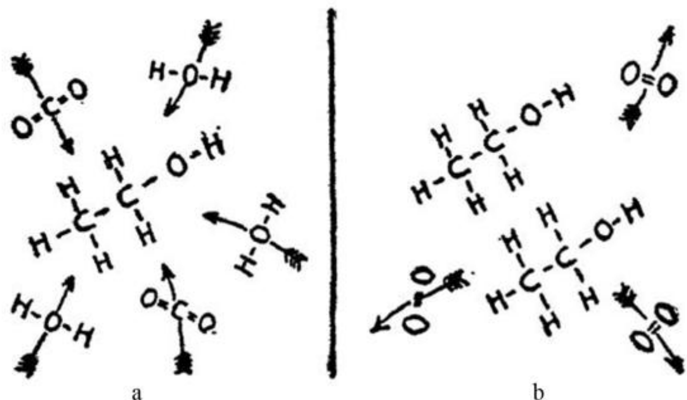


图 91

乙醇分子利用水分子和二氧化碳分子合成另一个乙醇分子的示意图。如果乙醇的这种“自我合成”的过程真的存在的话，我们就应当将乙醇视为活物质。

其实这个例子并不像看上去的那么异想天开，因为稍后我们将看到一种真实存在的复杂的化学物质，叫作病毒，它较为复杂的分子（由成百上千个原子构成）确实在将周围介质中的其他分子组织转化为与它们自身相似的结构单元。这些病毒粒子既是普通的化学分子又是有机生命，它们正是生命物质和非生命物质间“缺失的一环”。

不过现在，我们必须回到普通细胞的生长和繁殖的问题上来，尽管它十分复杂，但比起分子还是简单多了，并且细胞是最简单的生命体。

当我们通过制作精良的显微镜观察一个典型的细胞时，我们能看到它是由半透明的胶状物质组成的，其化学结构十分复杂。这种物质一般被称为原生质，它被一层细胞壁包裹着。动物细胞中的原生质薄且柔软，植物细胞中的原生质则厚而硬，这是为了使植物的躯体拥有足够的强度（图90）。[5]每个细胞内包含一个小球体，被称为细胞核，它是由精密的网状物质组成的，被称为染色质（图92）。值得注意的是，细胞中原生质的各个部分的透光度都是相同的，因而我们通常无法直接在显微镜下观察到细胞。为了能清楚看到细胞结构，我们需要利用“细胞中不同结构对染料的吸收程度不同”这一优势，对其进行染色。组成细胞核的网络的物质对染色过程尤为敏感，所以在浅色背景下更加清晰可见，[6]它因此得名“染色质”（chromatin），在希腊语中意为“染上颜色的物

体”。

在细胞准备进行关键的分裂过程时，原子核的网状结构会与之前大不相同，看上去是由一系列单独的粒子组成的（图92b、图92c），且通常呈纤维状或棒状，因而被称为染色体（意为“吸收颜色的物体”）。见附录图版V A、图版V B。[7]

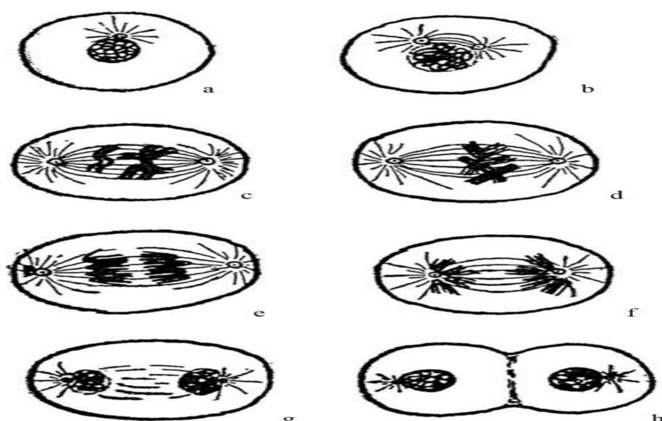


图 92

细胞分裂（有丝分裂）的各个阶段。

某一生物物种躯体内所有的细胞（除了所谓的生殖细胞）所包含的染色体数量是完全一致的，一般来说，越高级的生物其细胞内的染色体数量越多，反之越少。

小小的果蝇拥有一个引以为豪的拉丁名——Drosophila melanogaster，它在生物学家理解有关生物的许多基本内容的过程中，发挥了极大的作用。果蝇的每个细胞中包含8条染色体，豌豆植株的细胞中有14条，玉米有20条。而那些生物学家及其他所有人类，则可以骄傲地表示，自己的每个细胞中都带有46条染色体！毕竟纯粹从算术角度出发的话，这意味着人类比果蝇高级6倍。然而让人类哑口无言的是，蛤蜊的细胞里竟有200条染色体，这难道说明蛤蜊比人类要高级4倍？

值得注意的是，各种生物体内的细胞中，染色体的数量总是偶数。事实上，所有活细胞（我们将在后面讨论例外情况）中都有两套几乎一模一样的染色体（参见附录图版VA），一套来自母亲，另一套来自父亲。这两套来自双亲的染色体携带了复杂的遗传性状，并将代代相传，

这一点在所有生物中都一样。

生物的细胞分裂是由染色体开始的，每条染色体都会沿着长度方向，分裂成两条形状一致只是比原来更细的纤维，而此时，细胞仍是一个完整的独立单元（图92d）。

当这团原本纠缠在一起的染色体变得有秩序，准备开始分裂的时候，两个位于细胞核外缘、相互离得很近的中心体逐渐散开，运动到细胞的两端（图92a、图92b、图92c）。这两个中心体也会伸展出一些细线，与核中的染色体相连。当染色体一分为二时，其中的每一半都会与对应的中心体相连，并在细线的拉扯下与另一半分离（图92e、图92f）。在这个过程接近尾声时（图92g），细胞膜开始沿中心线向内凹陷（图92h），分裂出的每一半细胞都长出一层膜，并最终彼此脱离，形成两个新生细胞。如果两个新生细胞从外界得到了充足的食物，它们将生长到和母辈一样大的尺寸（即长大一倍），在一段时间的休息后开始下一轮分裂，与造就它们的方式如出一辙。

这一系列细胞分裂的步骤是我们通过直接观察得出的，至于这一现象的科学解释，由于我们对导致这一过程的物理作用和化学作用的本质还不了解，所以尚不能做出回答。细胞整体过于复杂，我们似乎还无法直接对其进行物理分析，并且在攻克这一问题之前，我们还必须要清楚染色体的本质——相比之下这就简单多了，我们将会在后文进行讨论。

不过首先我们需要考虑清楚，对于由大量细胞组成的复杂的生命体，细胞分裂是如何在其生殖过程中发挥作用的，这一点十分重要。这就好像那个古老的问题——先有鸡还是先有蛋？其实，在描述诸如此类的循环过程的时候，无论我们是先从蛋演化成鸡（或其他动物）的，还是先演化成鸡再下蛋的，其结果都是一样的。

假设我们是从一只刚刚破壳的鸡开始的，从它孵化（或者说出生）的那一刻开始，体内的细胞开始持续分裂，从而导致躯体快速生长和发育。大家应该还记得，成年动物体内包含上万亿个细胞，它们全部都是由一个受精卵经过源源不断的分裂后得到的。乍看之下我们会自然而然地认为，要得到这样的结果，必然经历无数次持续分裂的过程。但如果你还记得我们在第一章讨论过的两个问题：西萨·班·达伊尔诱使他仁慈的

国王在不经意间许下了赏赐他成几何级数增长的64堆麦粒的承诺，以及在世界末日问题中想要移动64个碟片需要花上多少年的问题，你便可以看出，其实只需要为数不多的几次连续的细胞分裂，我们就能够得到大量的细胞。假设一个人成年的过程中必须经历的细胞分裂次数为x，细胞的数量在每次分裂后都会翻番（因为一个细胞会变成两个），我们便能得到从单个卵细胞开始到最终成年的过程中，人体内细胞分裂的总次数公式：$2^x=10^{14}$，求解后$x=47$。

因此我们看到，一个成年人身体中的每一个细胞，都是那个带给我们生命的原始卵细胞的大约第五十代子孙。[8]

虽然在年轻动物体内，细胞分裂的速度很快，但成年个体体内的大多数细胞通常都处于“休眠状态”，只会偶尔进行分裂以“保养”身体，补偿老化和损耗的细胞。

现在我们开始讨论一种极其重要的特殊类型的细胞分裂，它会生成所谓的“配子”或“婚姻细胞”，是负责生殖功能的细胞。

任何双性别生命体中，都会有一些细胞在生长的最早期阶段被隔开，为未来的生殖活动做“储备”。这些细胞位于特殊的生殖器官中，在生命体的生长过程中，其分裂的次数明显少于一般的细胞，因而在准备繁衍下一代时，它们依然充满活力。当然，这些生殖细胞还是会发生分裂，只是比普通细胞的分裂方式更特别，也更简单。这些细胞的细胞核中的染色体不会像普通细胞那样一分为二，只是简单地相互分开（图93a、图93b、图93c），因此每个子细胞中只包含原始染色体的一半。

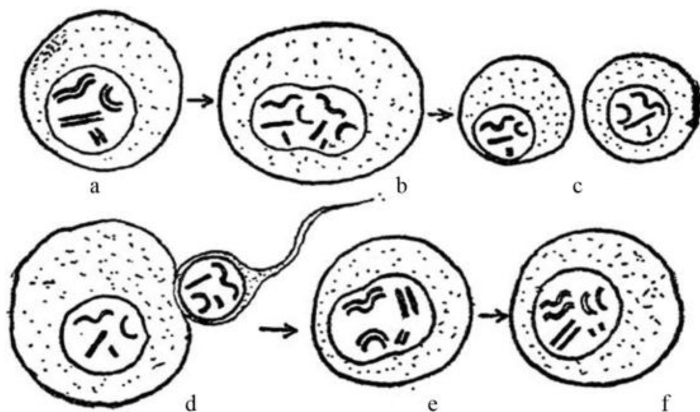


图 93

配子的形成（a，b，c）和卵细胞的受精（d，e，f）。在第一个过程（减数分裂）中，储备的生殖细胞中的染色体没有经过初步分裂，就分离成了两个“半细胞”；在第二个过程（配对）中，精细胞钻入卵细胞中，它们的染色体再度成对。随后受精的细胞开始进行正常的分裂（如图92所示）。

这一导致这些“染色体缺失”的细胞形成的过程，被称为减数分裂，与之对应的常规分裂过程则被称为有丝分裂。通过减数分裂得到的细胞被称为精细胞和卵细胞，或雄配子和雌配子。

细心的读者可能会疑惑，生殖细胞在分裂为两个相同的部分时，是怎样产生雄配子、雌配子两种不同的配子的呢？答案就藏在我们之前描述的内容中。染色体通常都是成对存在的，但是有一个例外，有一对特别的染色体，它们在女性身体里是相同的，但在男性体内却不同。这对特别的染色体被称为性染色体，以符号X和Y区分。女性体内的细胞中有两条X染色体，而男性体内的细胞中有一条X染色体和一条Y染色体，[9]这便是性别的基本差异（图94）。



图 94

男性和女性之间的“面值”差异。女性体内的所有细胞都包含24对相互对称的染色体，而男性体内的细胞中则有一对染色体是不对称的。女性有两个X染色体，男性则是一个X染色体和一个Y染色体。

因为女性身体内所有的生殖细胞都包含完整的X染色体对，所以经由减数分裂得到的每一半细胞或配子，都会含有一条X染色体。而在男性的生殖细胞中，因为X染色体和Y染色体各有一条，所以经由减数分裂得到的两个配子会分别包含X染色体和Y染色体。

在受精过程中，雄配子（精细胞）与雌配子（卵细胞）结合，从而得到含有两条X染色体的细胞，或含有一条X染色体、一条Y染色体的细胞的可能性各占一半，前一种情况会发育为女孩，后一种情况则会发育成男孩。

在下一节中我们会重新讨论这个重要问题，现在让我们继续叙述生殖过程。

雄性精细胞与雌性卵细胞结合（即“配合”），会形成完整的细胞，它随即开始有丝分裂，一分为二，如图92所示。新生成的2个细胞在短暂的休息后，会继续各自一分为二，得到的4个新细胞，进而再次重复这一过程。每个子细胞都会获得原始受精卵的全部染色体，其中一半来自母亲，一半来自父亲。图95为受精卵逐步发育为成年个体的过程的简单示意图，从图95a中我们可以看到，精子正在进入静止卵子的体内。

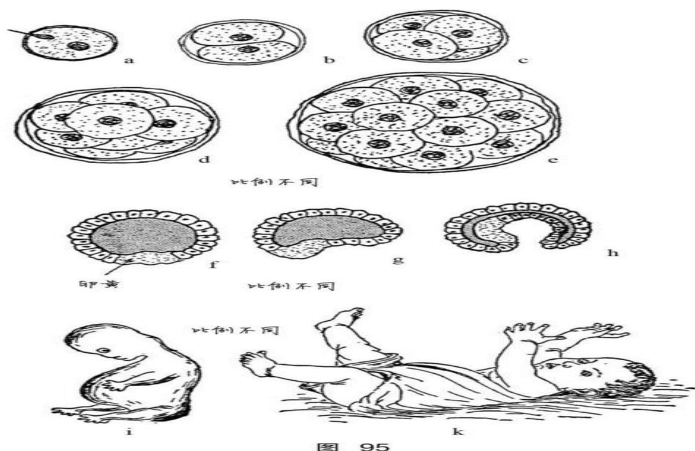


图 95

从卵细胞到人。

两个配子的结合促使新生细胞开始活动，它首先一分为二，继而再分裂成4个、8个、16个，等等（图95b、图95c、图95d、图95e）。当细胞数量增长到一定程度时，它们便倾向于排列成最有利于从周围的营养物质中吸收食物的形状。在这一发育过程中，生命体看上去就像一个有内腔的小泡泡，它被称为囊胚（图95f）。随后，外层的细胞会向内凹陷（图95g），生命体开始进入原肠胚阶段（图95h），此时的它看上去像一个“小荷包”，“小荷包”的开口既用于摄取新鲜食物，同时又用于排泄消化产生的废物。像珊瑚虫这样的简单动物在这一阶段就会停止发育，而更高级的物种则会继续生长、分化。其中的一些细胞会发育为骨架，另一些则发育为消化系统、呼吸系统及神经系统。在经历了多个胚胎阶段（图95i）之后，生命体最终会长成一个能够辨识出物种的年轻个体（图95k）。

正如上文所说，在生命体发育的最早期，一部分发育中的细胞会被隔开，为未来的生殖功能做储备。当生命体发育成熟时，这些细胞开始进行减数分裂，产生配子，进而重新开启整个的生命过程。生命便是这样开始繁衍生息的。

2.遗传和基因

在生殖过程中，最显著的特性便是：由双亲的配子结合成的新生命不会随意生长，而是长成与其父母或祖辈极其相似的样子，尽管它并不是一个完全的复制品。

事实上我们确信，一对爱尔兰塞特犬生下的幼崽最终只会长成狗的形态，而不会长成大象或兔子的样子，体形也是一样，并且它会有四条腿和一根长尾巴，头的两侧会各有一只耳朵和一只眼睛。我们还能颇有把握地确信，它的耳朵会是柔软而下垂的，它会拥有金棕色的长毛，而且它很可能会喜欢狩猎。此外，它也一定会保留它的父母、甚至更早的某一代祖先的一些细节特点，同时又具有自己的独特特性。

然而，所有这些被赋予一只良种爱尔兰塞特犬的特征，是怎样被放进两个相结合的配子中，使其发育成小狗的呢？

我们在上文中看到，每个新的生命体都会从父母那里分别得到恰好一半的染色体。很明显，某一物种的主要特征必然同时包含在父母双方的染色体中，而每个个体间细微的个性化特征，应当来自其中一方。并且，尽管鲜有人怀疑，在历经漫长的时间之后，随着世代的更迭，存在于各类动物和植物之中的（即使是最基本的）性状也会发生改变（生物的进化便是证明），但在人类有限的观察时间内，我们也只能注意到一些次要特征的微小变化。

对这些特征及其从双亲传递到子女的过程的研究，是遗传学这一新兴科学的主要内容，尽管它尚处于萌芽阶段，但已经告诉了我们许多令人兴奋的故事，那是有关生命的最深层的秘密。例如，我们已经了解到，与大部分的生物现象截然不同，遗传过程完全遵从简单的数学规律，这表明，我们观察到的这一过程只是一种基本的生命现象。

我们以色盲这一众所周知的视力缺陷为例，其中最常见的一种是不能区分红、绿二色。为了解释色盲，首先我们必须理解为什么我们能看到颜色，这就涉及视网膜的复杂结构和性质、不同波长的光造成的光化学反应等等。

说起色盲是如何遗传的，乍一看这一问题的解释似乎更加复杂，但答案却是出乎意料地简单。我们观察到的事实有：①男性色盲的比例比

女性高得多。②色盲男性和“正常”女性的孩子绝不可能是色盲。③色盲女性和“正常”男性的孩子中，儿子是色盲，女儿则正常。这些事实清晰地反映出了一个现象——色盲的遗传似乎与性别相关。我们只能先假定色盲这一特征是由于一条染色体出现了缺陷造成的，这条染色体代代相传，再结合我们已有的知识和逻辑，我们进一步推测，色盲是X染色体中的缺陷造成的结果。

由此，关于色盲的遗传规律就大白于天下了。你应该还记得女性的细胞中携带两条X染色体，而男性的细胞中只携带一条（另一条是Y染色体）。如果男性这条仅有的X染色体出现了这种特殊缺陷，那么他必定就是色盲。但若女性为色盲，则说明该女性细胞中的两条X染色体都受到了影响，否则仅有一条正常染色体也足以维持其对颜色的感知能力。如果X染色体出现这种颜色上的缺陷的可能性（比方说）是$\frac{1}{1\,000}$，那么1　000个男性中就会有一个是色盲；而女性体内的两条X染色体都出现颜色缺陷的可能性，应该经由概率乘法计算，（参见第八章）得到：$\frac{1}{1\,000}\times\frac{1}{1\,000}=\frac{1}{1\,000\,000}$，因而每100万个女性中才会有一个是色盲。

现在我们来思考色盲丈夫和“正常”妻子的情况（图96a）。他们的儿子将不会从父亲那里得到X染色体，而会从母亲那里得到一条正常的X染色体，因而不可能是色盲。他们的女儿则会分别从母亲那里得到一条正常的X染色体，又从父亲那里得到一条有缺陷的X染色体，因此她也不会是色盲，但她的孩子（儿子）可能会是。

相应的，在色盲妻子和“正常”丈夫的情况中（图96b），儿子必定会是色盲，因为他唯一的一条X染色体来自母亲。而女儿会从父亲那里得到一条正常的X染色体，从母亲那里得到一条有缺陷的X染色体，所以她将不会是色盲，但与前一种情况相同，她的儿子可能会是色盲。瞧，这多简单啊！

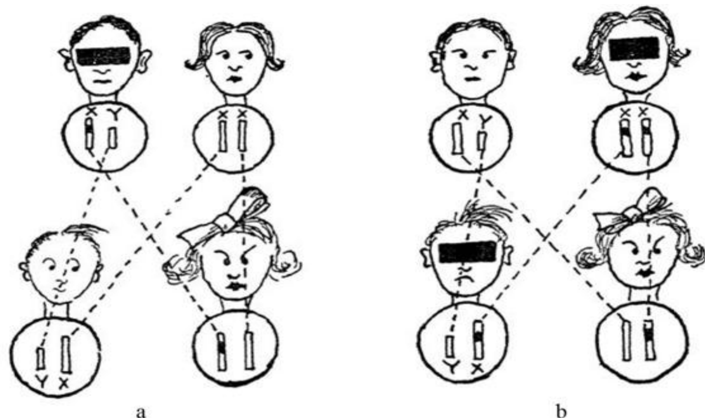


图 96

色盲的遗传。

像色盲这样必须一对染色体全部受到影响，才能表现出效应的遗传性状，被称为隐性遗传。它们可以隐匿在染色体中，从祖辈传递到孙辈，两只漂亮的德国牧羊犬之所以会偶然生出一只长得不像德国牧羊犬的小狗，罪魁祸首就是它。

与之相对的是显性遗传，即只要有一条染色体受到影响，这种性状就会显现出来。此时我们离开一下遗传学的实例，想象一种可以长出“米老鼠耳朵”的奇怪兔子，以此来描绘这一情况。首先我们假设“米老鼠耳朵”是显性遗传特征，也就是说，只要有一个染色体改变了，就足以让兔子的耳朵长成这种丢人（对于兔子而言）的形状。其次我们再假定，第一只拥有“米老鼠耳朵”的兔子及其后代兔子都会与正常的兔子交配，我们可以预测一下从第一只“米老鼠耳朵”兔子开始，后代的遗传情况如图97所示。造成“米老鼠耳朵”的染色体的变化位置已用黑点标出。

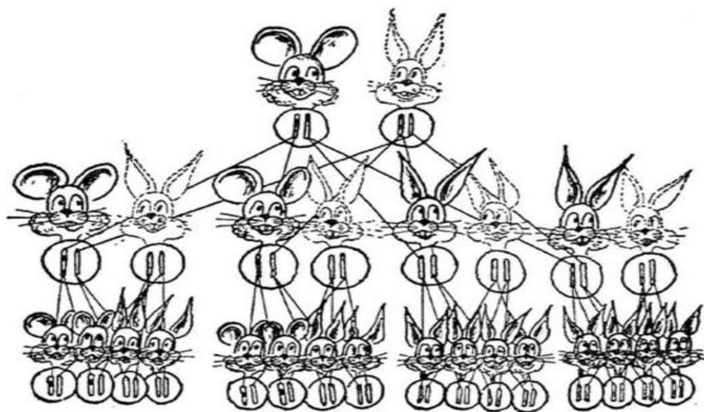


图 97

除了显性和隐性这种非此即彼的遗传特征外，我们还找到一种中间特征情况。假设我们的花园中有红、白两种颜色的草茉莉，当开红花的花粉（植物的精细胞）随着风或昆虫散播到另一朵红花的雌蕊上，它们会和雌蕊根部的胚珠（植物的卵细胞）结合，发育成种子，最终再次开出红色的花。同样的，如果白花的花粉传授给了另一朵白花，那么它们的下一代也一定会是开白色的花。但是，倘若白花的花粉落到了红花的雌蕊上，或反过来，红花的花粉落到了白花的雌蕊上，那么新长出来的植株就会开出粉红色的花。

然而，应该很容易就能看出，粉红色花并不是一种生物学上的稳定品种。当这种粉红色花互相授粉时，我们会发现，在其下一代中，有50%是粉红色花，25%是红花，25%是白花。

如果我们假设红色或白色的性状是由植物细胞中一个染色体携带的，那么上述情况就很容易解释了：若想得到纯色的花，两条染色体携带的特征必须一致，如果一条染色体携带红色特征，另一条携带白色特征，那么二者结合后的结果就是粉红色花。图98中简单呈现了“颜色染色体”在后代中的分布，我们能清楚看出上文说到的数字关系。如果再绘制一幅如图98一样的图示，我们也能很容易地展示出白花与粉红色花互相授粉后的遗传情况——我们得到的第一代应当有50%是粉红色花，50%是白花，而没有红花。同样地，红花和粉红色花的后代中，应该有50%是红花，50%是粉红色花，没有白花。这些便是差不多一个世纪前，朴实的摩拉维亚僧侣孟德尔（Gregor　Mendel）在布鲁恩附近的寺

院里种植豌豆时，最先发现的遗传定律。

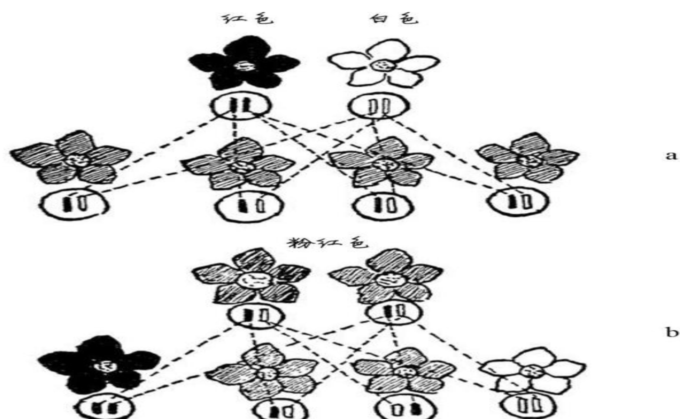


图 98

至此，我们已经将新生生命继承的各种性状，与它们父母双方的不同染色体联系起来了。但是，因为性状的种类几乎是无穷无尽的，而染色体的数量是有限的（果蝇的每个细胞中有8条染色体，人体的每个细胞中有46条染色体），所以我们不得不承认，每条染色体都携带了一长串的单独特征，可以将其想象成是沿着一条极其细长的纤维分布的。事实上，参见附录图版VA中显示的果蝇唾液腺的染色体[10]，我们会自然而然地认为，那些横在细长的染色体上的暗色条纹所表示的，就是它所携带的各种性状的位置。其中一些条纹决定了果蝇的颜色，一些条纹则决定了其翅膀的形状，而其他的条纹则决定了它有6条腿、身长大约$\frac{1}{4}$英寸及成为果蝇而不是蜈蚣或鸡这些事实。

事实上，遗传学也确实证实了，我们的这一猜想是完全正确的。染色体上的这些微小的结构单元叫作基因，我们不但证明了基因携带着各种遗传性状，还能在多数情况下指出特定的基因都对应着哪些特定的性状。

当然，即使是以最大放大倍率的显微镜来看，我们也几乎看不出基因之间的差别，它们的功能性差异潜藏于分子结构的深处。

因此，想要了解不同基因的“生命的意义”，我们就只能仔细研究在给定的植物或动物物种中，不同的遗传性状是如何世代相传的。

我们看到，任何新生的生命都会从父母那里各得到一半的染色体，而父辈和母辈的染色体也是从祖辈那里各得一半，因此我们会理所当然地认为，孙辈只会分别从父母双方的祖辈中遗传到其中一位的染色体。然而事实却并非如此，有时候，孙辈会同时遗传到四个祖辈的一些性状。

难道这意味着前文所说的染色体的传递规律是错的吗？不，我们并没有错，只是做了简化而已。在这个问题中，我们还需要纳入考虑的因素是，在减数分裂的过程中，储备的生殖细胞会分裂为两个配子，但在这之前，成对的染色体是纠缠在一起的，它们有可能发生部分的互换。这种互换过程（图99a、图99b）导致父母的基因序列混杂，从而造成混合遗传。有时单条染色体也可能折叠成环，随后再以不同的方式断裂，导致基因顺序错乱的情况（图99c，附录图版V B）。

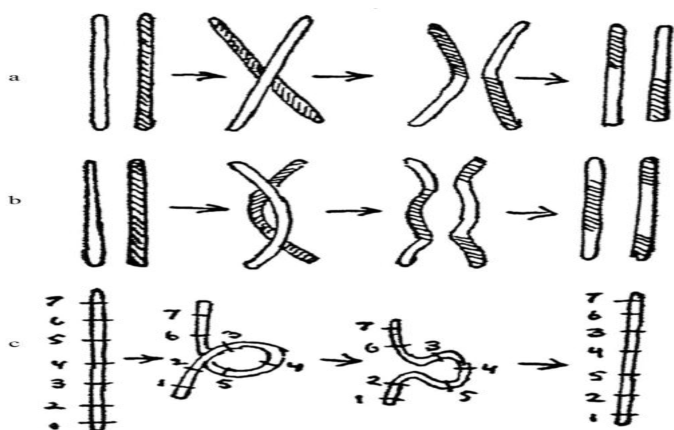


图 99

显然，一对染色体间或单条染色体内的基因重排，更有可能影响到那些原本距离很远的基因的相对位置。这就好像，我们在切牌时改变了整副牌上半部分和下半部分的相对位置（会让最上方的牌和最下方的牌凑到一起），但这只会分开一对相邻的牌，其他相邻的牌的位置关系并没有改变。

因此，若我们观察到有两种遗传性状几乎总是在染色体的交叉中结伴出现，我们就可以认为，这两种性状所对应的基因是近邻关系；相反，若某两种性状总是分开出现，那么它们对应的基因在染色体上的相对位置一定较远。

美国遗传学家摩根（T.H.Morgan）和他的学派继续顺着这一思路进行研究，他们成功确定了果蝇染色体完整的基因序列。图100是他们发现的在组成果蝇的4条染色体中，决定不同特征的基因的位置分布图。

当然，我们也可以为人类等更复杂的动物编制出如图100一样的基因分布图来，但这需要经过更多认真细致的研究。

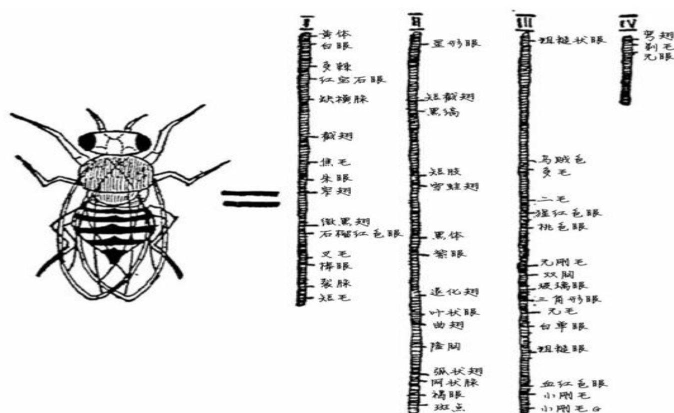


图 100

3.作为“活分子”的基因

在一步步分析生命体极度复杂的结构之后，我们现在似乎已经弄清楚了组成生命的基本单元。事实上我们看到，生命体的整个发育历程及成熟后的几乎所有性状，都是由深藏于细胞内的一组组基因决定的，换句话说，每个动物或植物都是“围绕着基因生长”的。如果要用一种高度简化的物理学内容做类比的话，我们可以将基因与生命体之间的关系，类比成原子核与一块无机物的关系。

同样地，给定物质的几乎所有物理性质和化学性质，也都可以归纳为原子核的基本性质，并且可以通过原子核的带电数量来描述。例如，携带6个基本电荷单位的原子核周围会有6个电子环绕，具有这种结构的原子会倾向于排列成规则的六角图案，从而形成极度坚硬并且折射率极高的晶体，我们称之为钻石。以此类推，一组带电量分别是29、16和8的原子核会使原子聚集成柔软的蓝色晶体物质，即硫酸铜。当然，相较

于晶体，即使是最简单的生命体也要复杂得多，但二者都说明了，是微观的核心单元决定了它们的宏观特征。

从玫瑰的芬芳到大象的长鼻，这些决定了生命体的一切性状的组织核心究竟有多大呢？想要解答这一问题，我们只需将一条普通的染色体的体积，分割为一系列包含于其中的基因即可。根据显微镜下的观察，染色体的平均厚度大约是千分之一毫米，因此其体积约为10^{-14}立方厘米。繁殖实验表明[11]，一条染色体通常决定了多达几千种不同的遗传性状，而果蝇（附录图版V）较大的染色体上横跨的暗条（假定是不同的基因）的数量，也直接证明了这一数据。用染色体的总体积除以基因的个数，我们得出，一个基因的体积不超过10－17立方厘米。而一个原子的平均体积约为10^{-23}立方厘米[$\approx (2\times10^{-8})^3$]，因此我们可以总结出，每个基因必定由大约100万个原子组成。

据此，我们还能进一步估计出人体内的基因总重量。

正如上文所述，成年人体内大约有10^{14}个细胞，每个细胞中包含46条染色体，因此人体内所有染色体的总体积是$10^{14}\times46\times10^{-14}\approx50$立方厘米，（因为生命物质的密度接近水的密度）它的重量一定不超过两盎司（约为57克）。就是这点微不足道的“组织物质”，在其自身周围建造了上千倍于自身重量的、组成动植物躯体的复杂“外壳”，并且“由内而外”地控制着生命体的每一步生长及其结构中的每一个特性，甚至是生命体的行为。

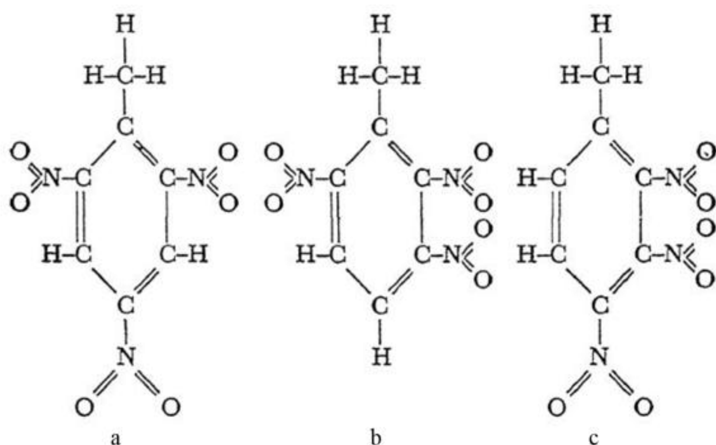
但基因本身又是什么呢？它是否可以被认为是一种复杂的“动物”，甚至，是否能够被细分为更小的生物单元呢？答案是显而易见的——不能，基因是组成生命物质的最小单元。此外，基因不仅具有区分生命物质和非生命物质的一切特性，而且与其他的复杂分子（例如蛋白质）之间也存在一定联系，这些复杂分子也都服从普遍的化学定律。

换句话说，基因似乎正是有机物和无机物之间缺失的那一环，也就是我们在本章开头考虑的“活分子”的问题。

确实，一方面，基因具有非凡的持久性，它能将物种的性状传递上千年而几乎不产生偏差；另一方面，组成基因的原子数目相对较少，我

们不能将它视为一个一成不变的结构，每个原子或原子团都不会老实待在预先设定好的位置。不同基因的性质的差异，决定了生命体的外部特性，我们可以理解为，是基因结构中原子分布的变化，造成了这些特性。

举一个简单的例子，我们以TNT分子为例——这是一种爆炸性物质，它在两次世界大战中扮演了主要角色。一个TNT分子由7个碳原子、5个氢原子、3个氮原子和6个氧原子按如下的3种构造之一排列而成：



这3种构造的区别在于 NO_2 基团在碳环上的连接位置，得到的3种物质分别被命名为αTNT、βTNT和γTNT。这3种物质都可以在化学实验室中合成，并且都很容易爆炸，只是在密度、溶解度、熔点、爆炸威力等性质上有微小的差别。借助化学的基础方法，我们能轻易地将 NO_2 基团从一个连接点移植到另一个连接点，从而将一种TNT转化为另一类。类似的例子在化学中也相当常见，而且分子越大，能够生成的变体（同分异构体）的种类也越多。

如果我们将基因视作由上百万个原子组成的巨大分子，那么不同原子团在这个分子中的位置的排列组合方式也将会有无限多种。

我们可以将基因想象为一条由周期性重复的原子团及各种附属基团

组成的长链，就像系在手镯上的饰坠。事实上，生物化学最新的进展也的确能帮我们绘制出一幅这串“遗传手镯”的确切图像。它是由碳原子、氮原子、磷原子、氧原子和氢原子组成的，被称为核糖核酸。图101中给出了一幅有些超现实主义的“遗传手镯”的图片，其中展现的是决定新生儿眼睛颜色的一部分基因（略去了氮原子和氢原子）。由这4个“饰坠”决定的婴儿的眼睛颜色是灰色。把这些“饰坠”轮换悬挂，我们就能得到无限种排列组合。

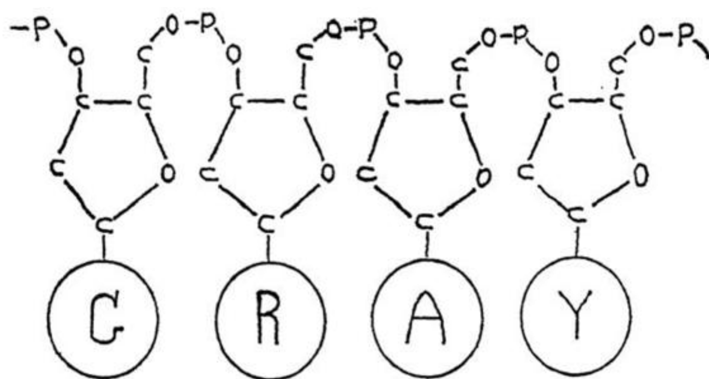


图 101

决定眼睛颜色的“遗传手镯”（核糖核酸分子）的一部分。（只是一张高度抽象的图！）

因此，假如我们有一条由10个不同的饰坠组成的手镯，我们就可以得到1×2×3×4×5×6×7×8×9×10＝3　628　800种不同的排列方式。

如果其中一些饰坠是相同的，那么这个排列组合的数量就要小得多。例如，在只有5种饰坠（每种2个）的情况下，我们就只有113　400种不同的排列方式。不过，随着饰坠总数的增加，排列方式的数量也同样会急剧增加，比如，依旧是5种饰坠的情况下，如果我们有25个饰坠，即每种饰坠各5个，那么能够产生的排列组合的数量就大约是62 330 000 000 000！

由此我们可以看出，在长链状的有机分子中，不同“饰坠”在不同“挂钩”上的排列组合情况显然有足够多种可能，不仅能够满足目前已知的生

命形式的所有变化，还能创造出我们想象不到的奇异特性。

关于这些不同性状的“饰坠”的分布问题，有一点极其重要：它们可能会自发地改变排列方式，从而导致整个生命体宏观发生改变。导致这种改变的最常见的原因，是普通的热运动，它会让分子整体弯折和扭曲，就像强风中的树杈。当温度足够高时，分子的这种振动运动便会强烈到足以将其自身分裂成碎片——即所谓的热分解（参见第八章）。但即使在低温下，当整个分子保持完整时，热振动还是会导致分子结构发生一些内部改变。例如，我们可以设想一下，长链状的分子发生扭曲，使某个“饰坠”靠近了另一点，这种情况很容易导致“饰坠”脱离原位置，与新的点连接。

这种现象被称为同分异构[12]，在常规化学领域的简单的分子结构中十分常见，它与所有的化学反应一样，都遵循基本的化学动力学定律，即温度每上升10℃，其反应的速率就会提高1倍。

基因分子的结构太过复杂，因而在很长一段时间内，有机化学家尽管已经尽了最大的努力，仍旧没有什么进展，如今还是无法通过直接的化学分析证明其异构变化。[13]然而，从某一角度来看，有一种方法要比在实验室进行化学分析容易得多：当这样的异构变化发生在雄配子或雌配子的基因里时，它们结合成的细胞会忠诚地延续这一变化，并通过细胞分裂代代相传，最终影响到动物或植物的宏观特性。

事实上，1902年，荷兰生物学家德弗里斯（De　Vries）确实发现了一项重要的遗传学研究结果：生命体总是会自发地发生跳跃性的遗传改变，我们称之为突变。

举个例子，我们继续回到上文提到过的果蝇的繁殖实验。果蝇的正常状态是灰色身体和长翅——基本可以完全确信，你在花园中任意抓到一只果蝇都是这样的。然而在实验室的繁殖实验中，曾获得过一只特别的“畸形”果蝇，这只果蝇与众不同地拥有短翅和几乎全黑的身体（图102）。

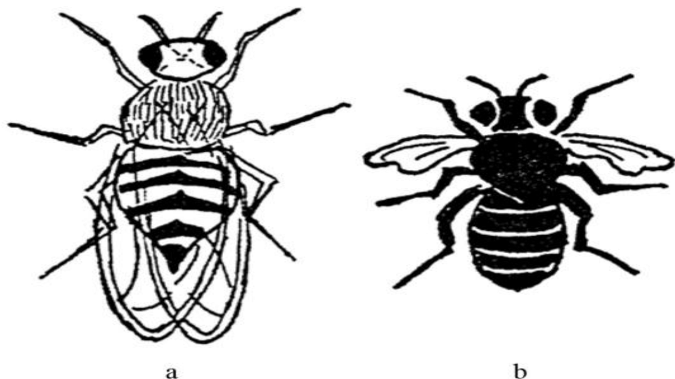


图 102

果蝇的自发突变。

a.正常类型：灰色身体，长翅。

b.变异类型：黑色身体，短翅（退化翅）。

重点是，除了这只短翅黑色果蝇，你不会发现其他身体颜色深浅不一、翅膀长度各异的果蝇，也就是说，这种极端例外（近乎全黑和极短翅）并非在世代更迭中逐渐调整，它和正常的祖辈之间没有中间过程。根据规律，新一代的所有成员（它们可能有几百个之多！）通常都是一样的颜色和一样的翅膀长度，只有一个（或少数几个）是完全不同的，要么没有发生任何改变，要么就发生了极大的变化（突变）。在另外几百个例子中，也观察到了类似的情况。比如色盲就不完全是来自遗传，有些婴儿就是天生色盲，并非遗传自任何一位祖先。人类的色盲就同果蝇的短翅情况一样，都保持着“要么都是，要么没有”的准则，这不是一个人分辨颜色的能力高低的问题——他要么就是能辨别，要么就是完全无法辨别。

所有听说过查尔斯·达尔文（Charles Darwin）的人都知道，新一代性状的改变，伴随着适者生存的斗争，指引了物种进化的稳定过程，[14]这也是数十亿年前地球上的王者——最简单的软体动物，最终能够演化为像你我一样（甚至连本书这样极度复杂的书籍也能够阅读和理解）的高级智慧生命的原因。

从上文谈到的基因分子异构改变的角度出发，就可以完美理解遗传

性状的这种跳跃式改变：在基因分子中决定性状的“饰坠”更换位置的过程中，它不可能暂停在半路上，只能是要么留在原始位置，要么连接上新的位置，从而造成生命体性状的不连续改变。

突变是由于基因分子的异构改变而产生的这一观点，在“生物的突变率依赖于动植物周围的培养环境的温度”这一点上同样获得了强有力的支持。事实上，由蒂莫费耶夫（Timoféëff）和齐默尔（Karl Günter Zimmer）进行的实验性工作，考察了温度对突变率的影响，其结果表明，（除了一些由周围介质和其他因素引起的额外的复杂变化外）与其他普通的分子反应一样，基因突变也遵循着相同的基础物理化学定律。这一重要发现促使马克思·德尔布吕克（Max Delbrück，曾为理论物理学家，现为实验遗传学家）提出了一个划时代的观点：生物突变的现象与分子异构变化这一纯粹的物理化学过程是等效的。

我们可以无休止地继续讨论基因理论的物理基础，尤其是在X射线和其他辐射产生的突变提供了重要证据的基础上。但对于各位读者而言，前文的叙述已经足以让大家认识到，现今的科学正在跨越对神秘的生命现象进行纯粹的物理解释这道门槛。

在结束这一章之前，我们不能不提到一种名为“病毒”的生物单元，它似乎是没有被细胞包裹的自由基因。直至不久前，生物学家仍相信最简单的生命形式是细菌——一种在动物和植物体内的活组织中生长繁殖的、有时会造成各种疾病的单细胞微生物。例如，科学家通过显微镜观察揭示出，伤寒就是由一种特殊的细菌引起的，这种细菌身形细长，大约3微米（μm）[15]长，0.5微米宽；猩红热是由一种直径为2微米的球状细菌引起的。还有一些疾病，例如人体的流行性感冒和烟草植物的花叶病，在常规显微镜下未能找出任何正常尺寸的细菌。但因为这些“无菌”疾病会通过患病的个体向健康的个体传播，与其他普通疾病的传播方式相同，而且这种感染会迅速扩散至被感染个体全身，所以我们顺理成章地假设它们与某种生物携带者有关。这种生物携带者就被称为病毒。

直到最近，微生物学家才通过超显微技术（使用紫外线），尤其是电子显微镜（使用电子束而非普通的光线，可以获得更高的放大倍率），初步揭开了潜藏已久的病毒的神秘面纱。

我们发现，病毒其实是大量不同种类的粒子，同种病毒的大小相同，且远小于普通的细菌（图103）。流行性感冒病毒是直径约0.1微米的球形粒子，而烟草花叶病毒是长0.28微米、宽0.15微米的细长形粒子。附录图版VI展示了一张令人惊叹的烟草花叶病毒粒子的电子显微镜照片，这是已知的最小的活性单元。你应该还记得一个原子的直径是0.000 3微米，而烟草花叶病毒大约只有50个原子宽、1 000个原子长，其总共包含的原子数不过几百万个！[16]

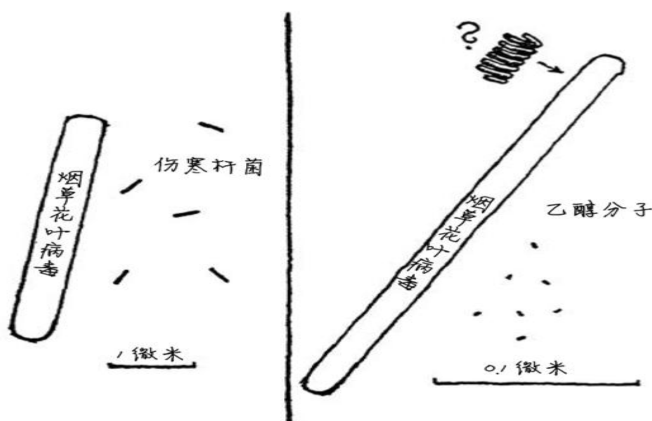


图 103

细菌、病毒和分子的大小比较。

看到这个数值，此时另一个熟悉的数值——单个基因中的原子的数量——立刻浮现于我们脑中，其中存在一种可能性：病毒粒子是否可以被看作是“自由基因”？因为它们既没有连成长条得到染色体，也没有被移动迟缓的细胞原生质所包围。[17]

的确，病毒粒子的繁殖过程看上去与细胞分裂中染色体复制的过程是一样的路线：它们的整个躯体沿轴线分离，产生两个完整的病毒粒子。显然我们所看到的是一个基本的繁殖过程（如图91所示的想象中的酒精的繁殖过程），整个复杂分子中的各种原子团都在从周围的介质中吸取与其自身相似的原子团，并将吸取来的原子团按照与原分子完全一致的顺序排列组合。当排列完成时，新的分子也已经成熟了，从原来的分子上脱离出来。事实上，在这种原始生命中，似乎并不会发生普通的“生长”的过程，而新的生命体仅仅是依附在旧的生命体上进行“组装”而已。打个比方，这就好像人类婴儿是诞生在母亲体外的，连接着母

亲进行生长发育，等到他们长大后就会和母亲的身体分离。

理所当然的，这样的繁殖过程只能在特殊的介质中进行。事实上，病毒粒子并不像细菌一样有自己的原生质，它们只能在其他生命体的活的原生质中繁殖，也就是说，病毒对自己的“食物”非常挑剔。

病毒的另一个普遍的特性是，它们能发生突变，并且突变后的个体能依据我们熟悉的基因学定律，将它们新获得的特性传递给下一代。事实上生物学家已经能辨别出同一种病毒的多条遗传谱系，并对它们的种族繁衍展开追踪。当一场新的流行性感冒横扫整个社区时，我们清楚地知道它们是由突变的新种类流行性感冒病毒引起的，它具备某些针对人体的新的凶残性状，人体暂且还没有对此建立起相应的免疫机制。

在前文中，我们已经发展出一系列表明病毒必须被视作活的个体的有力论据。现在我们同样可以坚定地说：这些粒子也一定是常规的化学分子，它们服从所有的物理化学规律。事实上，有关病毒物质的纯粹化学研究已经证实了，病毒是有确定组成的化学物质的，我们可以将其与一般的复杂有机（但不是活的）成分同等对待，并且，病毒可以参与各种类型的置换反应。如此看来，生物学家迟早能像写出酒精、甘油或糖的化学式一样，轻松地写出病毒的化学结构式，一切只是时间问题。更令人惊异的是，同种病毒粒子竟然拥有完全一样的尺寸。

实际上，病毒粒子在脱离了营养介质后，就会排列成普通的晶体的形状。例如，所谓的番茄矮丛病病毒就会结晶成大而美丽的菱形十二面体！你可以把这种晶体与长石、岩盐一同放进矿物展示柜里，但若是你将其放回到番茄植株中，它就又会转变成一团活生生的个体了。

利用非有机物质人工合成生命物质的最重要的第一步，是最近由美国加州大学病毒研究所的海因茨·弗兰克尔·康拉特（Heinz Fraenkel-Conrat）和罗布利·威廉姆斯（Robley Williams）率先跨出的。在研究烟草花叶病毒时，他们成功地将病毒粒子分成了两部分，每一部分都是非活性的复杂的有机分子。我们早已知道，这种长条形的病毒（附录图版VI）的中心是一束长而直的组织物质分子（名为核糖核酸），外面缠绕着长长的蛋白质分子，就像电磁铁中围绕在铁块周围的线圈一样。通过使用各种化学试剂，弗兰克尔·康拉特和威廉姆斯成功破坏了这些病毒粒

子，将核糖核酸毫发无损地从蛋白质分子中分离出来，从而得到了一试管的核糖核酸水溶液及一试管的蛋白质分子溶液。从电子显微镜照片上来看，两个试管中只包含了这两种物质分子，完全没有生命的迹象。

然而，当两种溶液混合在一起时，核糖核酸分子就会开始成群地结合，每一束都包含24个分子，而蛋白质分子则开始自发地缠绕在其周围，完全复制成实验开始前病毒粒子的样子。将这些被拆解后又重新组装的病毒粒子置于烟草的叶片上时，它们仍旧会引发植物的花叶病，就好像它们从未被拆解一样。显然，在这个实验中，试管里的两种化学成分是由活的病毒拆解出来的，更重要的是，生物学家已经具备了将普通的化学元素合成为核糖核酸及蛋白质分子的能力。尽管如今（1960年）我们只能人工合成这两种物质的小分子，但可以肯定的是，在不久的将来，我们一定能够通过最简单的元素制造出与核糖核酸和蛋白质一样长的分子，将这些分子组合在一起，我们就能制造出人造病毒粒子。

[1]　记得我们在讨论原子结构的时候说过，一个镁原子（原子序数12，原子量24）包含一个原子核（由12个质子和12个中子构成）和12个电子。将一个镁原子等分之后，我们将得到两个新的原子，每个新原子包含6个核质子、6个核中子及6个外层电子——换句话说，也就是2个碳原子。

[2]　有时单个细胞也会具有较大的尺寸，例如大家熟悉的鸡蛋的蛋黄，它就只是一个细胞。但即使是在这种情况下，细胞中有生命的关键部分还是只能借助显微镜看到，而剩余的大块黄色物质只不过是为胚胎的发育而积累的储备食物。

[3]　将大量的盐溶于热水，随后冷却至室温便可以制成过饱和溶液。因为盐在水中的溶解度会随着温度的降低而下降，导致水中盐分子的数量超过了水的溶解能力。但是，超出的盐分子会在很长时间内继续保持溶解状态，除非我们放入一小块晶体，它可以说是给予了“第一推动力”，组织盐分子从溶液中析出来。

[4]　上述假想反应的化学式为：$3H_2O + 2CO_2 + [C_2H_2OH] \rightarrow 2[C_2H_2OH] + 3O_2$，一个乙醇分子会生成另一个

乙醇分子。

[5] 准确来说，动物细胞的最外层是细胞膜，而植物细胞的最外层是细胞壁，内层是细胞膜。文中所说的动植物细胞外壳的性质，分别对应的是细胞膜和细胞壁的性质。通常情况下动物需要全身运动，而植物则是静止的，结合细胞壁和细胞膜的性质，就能明白为什么动植物细胞的外壳会有所不同了（译注）。

[6] 有一个与之类似的例子：用蜡烛在纸上写一点东西，写出的字迹当然是不可见的，这时你可以用铅笔将纸面涂黑，因为石墨不会附着在有蜡的地方，所以字迹在黑色背景下便会非常清晰。

[7] 有一点必须记住，在对活细胞进行染色时，我们通常会先杀死它以停止其进一步的活动。因此细胞分裂的连续画面，如图92，并不是观察同一个细胞得到的，而是通过对分别处于不同分裂阶段的几个细胞染色（和杀死）得到的。当然，这并不影响我们对细胞分裂的研究。

[8] 有趣的是，我们可以将这一计算过程类比到“如何维持原子弹爆炸”的计算（参见第七章）中。设使1 000克物质（总计$2\times5\times1024$个原子）中的每个铀原子都发生裂变（“受精”），所需的连续原子核分裂次数为x，则可以推出等式：$2x=2\times5\times1024$，求解后$x=61$。

[9] 这一描述适用于人类及所有的哺乳动物。但在鸟类中情况却正好相反；公鸡拥有两条同样的性染色体，而母鸡的两条性染色体却是不同的。

[10] 与大多数情况不同的是，在这个特殊例子中，染色体罕见地大，因而它们的结构可以通过显微照相，从而轻易地被我们研究。

[11] 普通染色体的尺寸太小，因而即使在显微镜下我们也无法分辨出单个基因。

[12] “同分异构”的概念上文已经解释了，指的是原子种类相同但排列顺序不同的分子。

[13] 基因是染色体上显示生物性状的特定片段，而染色体和基因

的本质实际上是DNA链。DNA即脱氧核糖核酸，是由脱氧核苷酸组成的大分子聚合物。脱氧核苷酸由脱氧核糖、磷酸和碱基组成，其中脱氧核糖和磷酸相连接，形成链状，而两条链中的碱基两两相配，从而两条链缠绕在一起，形成众所周知的双螺旋结构。上文提到的“遗传手镯”和“饰坠”分别指的就是DNA双螺旋链和碱基，而决定形状和遗传特性的实际上也正是碱基（译注）。

[14]　突变的发现对达尔文经典理论的唯一修订是，进化是不连续的跳跃式改变，而不是达尔文所想的连续的微小改变。

[15]　1微米等于$\frac{1}{1\,000}$毫米，或0.000 1厘米。

[16]　组成病毒粒子的原子的个数实际上应该比这一数值更小，因为这些病毒很有可能是“中空”的螺旋分子链形态（图101）。我们假设烟草花叶病毒确实是这样的结构（图103），则各种原子团就只位于圆柱体的表面，因此每个粒子的原子总数会减少到只有几十万个。当然，单个基因中的原子可能也是这种情况。

[17]　病毒的结构简单来说是一层名为衣壳的蛋白质外壳包含RNA或DNA链，RNA就是下文提到的核糖核酸。RNA在高等生命体中也存在，主要负责遗传信息的转录和蛋白质的合成，与DNA的工作相对应。与DNA不同的是，RNA只有一条单链，其中的组成单元核糖核苷酸在组成上与DNA的区别在于核糖与脱氧核糖，以及DNA的4种碱基中RNA替换掉了一种（译注）。

第四部分：宏观宇宙

第十章 拓宽视野

1.地球与它的邻居们

现在请让我们从去往分子、原子和原子核的旅程中返回，回到那些我们更熟悉的宏观物体上，我们已经准备好开启一趟全新的旅程，只不过现在我们要去往另一个方向，去往太阳、恒星、遥远的星云及宇宙的终极边疆。如同微观世界的旅程一样，科学在这里的发展引领我们从熟悉的事物，走向越来越广阔的遥远边界。

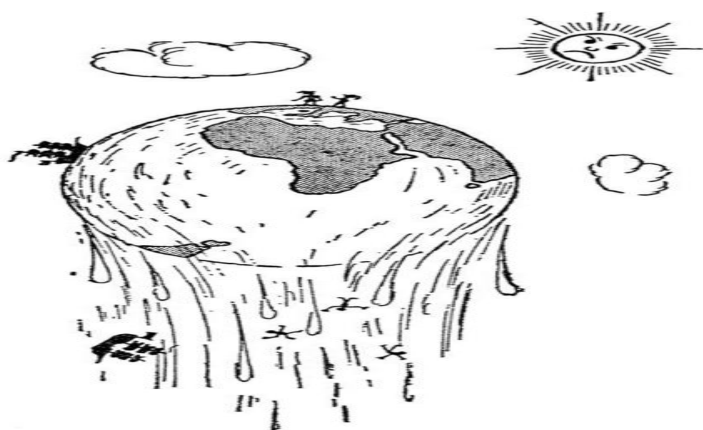
在人类文明发展的早期，我们称之为“宇宙”的东西可以说是难以置信地小。在那时，地球被认为是一个巨大的扁盘，漂浮在“世界海洋”之上。地表之下只有深不可测的海水，头顶上的天空是神明的居所。这个扁盘非常大，能够承载当时已知的所有陆地，即地中海沿岸，包括欧洲、非洲和亚洲的一小部分。地球扁盘北面的边缘被高大的山脉阻断，山后是夜晚太阳在世界海洋上休息的地方。图104相当准确地表示出了当时的人们眼中的世界。然而，在基督降临前的三世纪，有人对这个简单且被普遍接受的世界图景提出了反对意见，他就是著名古希腊哲学家（当时人们这样称呼科学家）亚里士多德（Aristotle）。



图 104

古人眼中的世界。

亚里士多德在他的著作《论天》（About Heaven）[1]中阐述了他的理论，即地球是被陆地和水覆盖的、被空气包裹的球体。他引用了许多现象来佐证他的观点，当然，这些现象在现在看来是理所当然的。他指出，一艘船消失在地平线上时总是船身先消失，而桅杆还竖立在水面上，这可以证明海面是弯曲的，而非平坦的。他还认为月食是地球的影子遮住了月球表面所引起的，因为影子是圆的，所以地球本身也一定是圆的。可惜当时只有极少数人相信他。人们无法理解，如果他说的是真的，那居住在地球球面对侧的人们（所谓的对跖点，换句话说就是澳大利亚人[2]）为什么能够倒立行走而不摔倒，而那里的水流又为什么不会流向他们所说的蓝天呢（图105）。


图 105

反对球形地球说法的论点。

你看，那时的人们并不知道，物体是因为受到地球引力才不会摔落的。他们认为“上”和“下”都是空间中的绝对方向，这种位置关系在哪里都应该是一致的。对于他们而言，“在地球的另一半，那里的‘上下’关系与他们所认知的‘上下’关系完全是相反的”这一理念，就仿佛今天某些人对爱因斯坦的相对论的看法一样，认为这是疯狂的。

当时的人认为，重物之所以会摔落，是因为所有物体都具有向下运动的“自然趋势”，而非我们现在所说的地球的引力，因此，若你胆敢跑到球形地球的另一面去，那么你就会坠入蓝天！当时对亚里士多德的新

观念的反对声振聋发聩，这一新观念没能被人们所接受，直到2 000年后的15世纪，你还能在当时出版的书中找到嘲讽球形地球的插画，上面画着居住在地球对跖点上的居民，他们每个人都是倒立着的。可能就连伟大的哥伦布（Columbus）本人，在启程寻找“从反方向去往印度的环路”时，也觉得自己的计划并非完全可靠。事实上他也的确没能完成这一目标，因为美洲大陆阻拦了他。

直到麦哲伦（西班牙名为Fernando de Magalhães，大家更熟悉他的英文名Magellan）进行了著名的环球航行，人们对球形地球的最后一丝质疑才终于消散了。

当人们开始意识到地球是巨大的球体时，便自然而然地产生了疑问：这个“球”究竟有多大？他们当时已知的世界在这个“球”上又占多大面积？然而，人们如何才能在不进行环球旅行的情况下测出地球的尺寸呢？这对古希腊的哲学家们来说又是一道难题。

当然，方法总是有的，是当时居住在希腊殖民地——埃及亚历山大里亚——的著名科学家埃拉托斯特尼第一个发现了这个方法。他听闻，在位于尼罗河上游，距亚历山大里亚以南5 000斯塔迪姆[3]的一座名叫塞恩[4]的城市里，春分时，正午的太阳会直射这座城市，彼时，城中所有垂直于地面的物体都是没有影子的。埃拉托斯特尼知道，这件事从未在亚历山大里亚发生过，因为在春分那天，正午的太阳会经过亚历山大里亚天顶（即头顶正上方）以南7°的位置，或者说，位于天顶整个圆周的约$\frac{1}{50}$处。基于地球是圆的这一理论，埃拉托斯特尼对这一现象给出了一个非常简明的解释，你只需要看一眼图106就能明白。简单来说，因为两座城市间的地表是弯曲的，所以直射塞恩的阳光在射向更靠北的亚历山大里亚时，一定会偏移一定的角度。从图106也可以看出，如果从地心画两条分别穿过亚历山大里亚和塞恩的直线，那么这两条线的夹角，必然会同地心到亚历山大里亚的直线（即亚历山大里亚的天顶方向）与阳光直射塞恩时的光线的夹角相同。

图 106

既然这个夹角是圆周的$\frac{1}{50}$，那么地球的周长就应该是两座城市间距离的50倍，也就是250 000斯塔迪姆。1斯塔迪姆约等于$\frac{1}{10}$英里，因此埃拉托斯特尼算出，地球的周长等于25 000英里，即40 000千米，这一结果与当今测量的结果非常接近。[5]

然而这件事的重点并不在于获得了准确的地球周长数据，而是人们自此开始意识到，原来地球是如此之大，它的总面积要比当时已知的全部陆地的总面积还要大上几百倍！如果这是真的，那已知的边疆之外又是什么呢？

接下来我们就要说到天文距离，但在此之前，我们必须先了解视差位移（简称视差）的概念。这个词听起来有些高深，但别担心，视差实际上是个简单且实用的工具。

我们可以尝试借助穿针引线的过程来了解视差。试着闭上一只眼将线穿过针眼，你很快会发现自己根本做不到，手里的线头不是在针眼后面很远的位置，就是太过靠前，只用一只眼睛完全无法判断针和线之间的距离。但如果使用双眼你就能轻易做到了，或者，至少你也能很快掌握将线穿过去的方法。这是因为，当你用两只眼睛注视一个物体时，你的双眼会自动向物体对焦。物体离双眼越近，你的两个眼珠也会转动得越靠近，这种调整会刺激肌肉，从而使你确切感知到物体间的距离。

现在，你不再用双眼看，而是先闭上一只眼，再睁开，换另一只闭

上。此时你会注意到，物体（此例中的针）与遥远背景（例如房间尽头的窗户）的相对位置发生了改变。这种效应就被称作视差位移。大家对这种情况应该都很熟悉吧，如果你从没听过这个，也可以亲自尝试一下上面的步骤，或者通过图107中左右眼视角下的针与窗户的相对位置来理解。

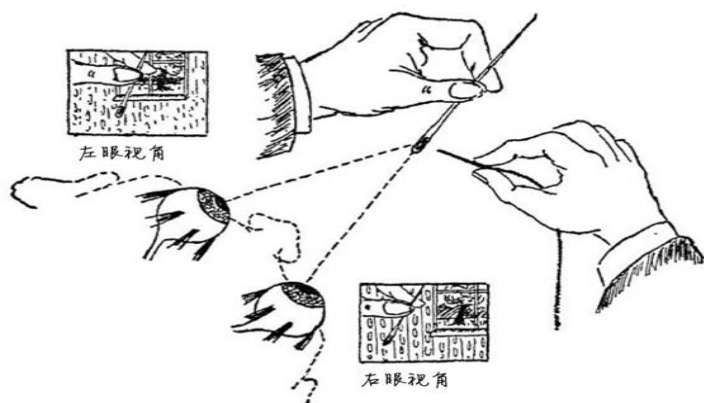


图 107

物体距离越远，视差位移越小，因此我们可以借此来测量距离。视差位移能够用弧度来精确测量，相比于仅仅依靠附着于眼球的肌肉简单地感知距离，这一方法要精准得多。然而还有一个问题，我们的双眼仅仅相距约3英寸，它们无法准确估计几英尺以外的物体的距离，况且在这种情况下，双眼的视线轴将趋近于平行，产生的视差位移完全小到难以测量。为判断更远的距离，我们需要将双眼分得更开，从而增大视差位移的角度。不，不要误会，我不是叫你去做手术，事实上我们只需要用镜子玩个花招就行了。

图108中我们看到的是海军在战斗中用于测量敌舰位置的一种装置（在雷达发明之前），装置的主体是一根长管，在人眼前方安装了两面镜子（A，A'），长管的两端也各有一面（B，B'）。通过这样一架测距仪看去，实际上相当于你一只眼睛在B处，另一只眼睛在B'处进行观察。此时两眼间的距离——也叫作光学基线——显著增大，因此你能估计出更远的距离。当然，海军士兵并不仅仅依赖眼球和肌肉感知距离，测距仪上还装有特殊的部件和刻度盘，从而能极为精确地测量出视差位移。

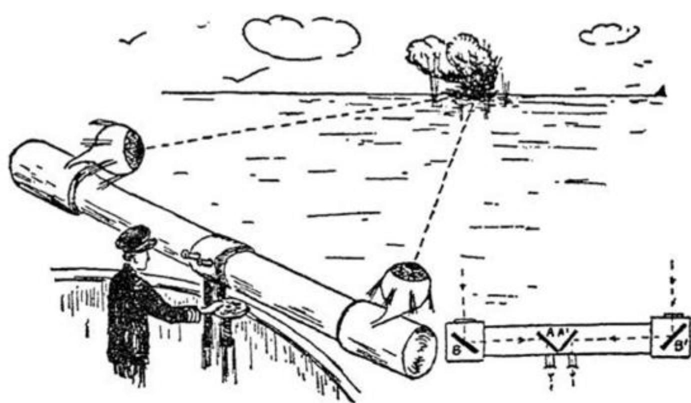


图 108

即使在敌舰近乎隐没于地平线时，这台海军测距仪也能很好地完成任务。然而，在测量月球这样一个与我们十分靠近的天体的距离时，它却无计可施。

事实上，为了能注意到月球相对于遥远恒星背景的视差位移，光学基线，也就是两眼间的距离至少要达到几百英里远才行。显然，我们无须制造这样一台能让我们一只眼睛在华盛顿、另一只眼睛在纽约观测的光学系统，因为只需要同时在这两座城市拍摄一张群星映衬下的月球的照片即可。如果将这两张照片放进一台普通的立体镜，你会看到月球悬浮在星星点点的背景夜空之上。通过测量这两张照片中月球与背景恒星的相对位置（图109），天文学家发现，在地球上的两个对跖点测到的月球的视差位移是1°24′5″，由此求得地月距等于30.14个地球直径，也就是384 403千米，或238 857英里。

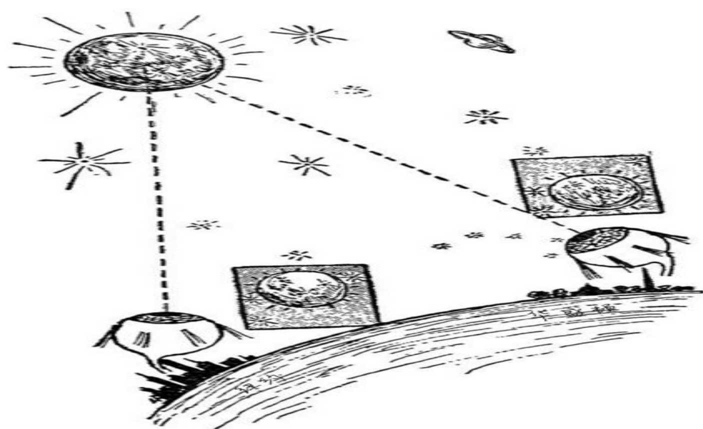


图 109

根据这一距离及观测到的月球的角直径，我们得知，我们的这颗卫星的直径大约是地球的1/4，而它的表面积只有地球的约1/16，约等于非洲大陆的面积。

同样地，我们也可以测量出地球到太阳的距离，尽管这项测量的难度显然要更大一些——因为太阳离地球要远得多。经测算，天文学家最终发现日地距离是149 450 000千米（92 870 000英里），也就是地月距离的385倍。正是因为这个巨大的距离，才使太阳看上去和月球一样大小，实际上太阳要比月亮大得多，它的直径是地球直径的109倍。

如果把太阳比作一个大南瓜的话，那地球就是一颗豌豆，月球就是一粒罂粟籽，而纽约帝国大厦[6]则是只有在显微镜下才能看到的微小细菌。这里不妨提一下，在古希腊时代有一位进步哲学家安那萨格拉斯（Anaxagoras），他不过是因为传授了“太阳是一个大概有整个希腊大小的巨大火球”这一理论，就被流放，甚至遭受了死亡的威胁！

利用同样的方法，天文学家还能够估计出太阳系中其他行星的距离。其中最遥远的那颗——最近才被发现的冥王星[7]，到地球的距离大约是日地距离的40倍，为5 903 000 000千米（3 668 000 000英里）。

2.星系中的满天星

我们再往太空迈进一步，这次是从行星迈向恒星，此时视差方法依旧可用。但是我们发现，即使是距离我们最近的恒星也是相当遥远的，就算是从地球上相距最远的两点（球面上的对跖点）观测，我们也看不出浩瀚星空背景下的这些恒星有任何的视差偏移。好在我们最终还是找到了测量这些遥远距离的方法：既然我们能利用地球本身的尺寸测量出地球围绕太阳公转轨道的大小，那我们为什么不能用这个公转轨道来获得恒星的距离呢？换句话说，如果从地球公转轨道的两端观测，是不是就能或多或少地看出一些恒星的相对位移呢？虽然为了完成两次观测，我们需要等上半年，但这值得一试。

怀揣着这样的想法，德国天文学家贝塞尔（Friedrich Wilhelm

Bessel）于1838年开始了测量实验，比较相隔半年的两个夜晚恒星的相对位置。起初他并不走运，因为他选中的恒星都太过遥远，即使以地球轨道为基线，它们也并未显示出显著的视差位移。但是幸运之神还是眷顾了他，“天选之星”最终出现了，它在星表中名为天鹅座61（61 Cygni，即天鹅星座中的第61亮星），相比于半年前，这颗恒星看起来似乎有些许位移。（图110）

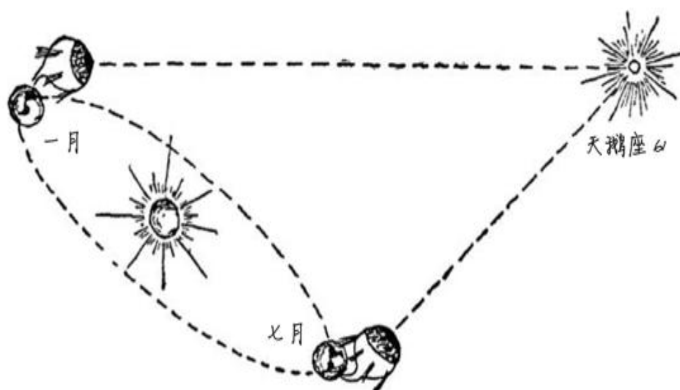


图 110

又过了半年，这颗恒星重新回到了原位。显然，贝塞尔观察到的位移就是视差效应，他也因此成了带着量天尺跨出太阳系走向星际空间的第一人。

贝塞尔观测到的天鹅座61在一年内的位移其实很小，只有0.6弧秒，这就像在看500英里外的一个人（如果你看得到这个人的话）！但天文仪器是很精确的，即使是这样的角度也能被非常精确地测量出来。根据观测得到的视差，和已知的地球轨道的直径，贝塞尔计算出这颗恒星离我们有103 000 000 000 000千米远，是日地距离的690 000倍！这个数字简直大到让人难以置信。借用之前的比喻，如果太阳是个南瓜，那么地球就是在200英尺外围绕其旋转的豌豆，而这颗恒星的距离则足足有30 000英里！

在描述非常遥远的距离时，天文学家习惯以“每秒300 000千米的光速走过这段路程所需的时间”来代指。光只需$\frac{1}{7}$秒即可环绕地球一圈，需要1秒多一点的时间到达月球，需要大约8分钟到达太阳。而从天鹅座

61这个距离我们最近的邻居发出的光，却需要大约11年才能到达地球。如果因为某种宇宙灾难，来自天鹅座61的光芒熄灭了，或者（经常发生于恒星的）随着一道闪光这颗恒星爆炸了，我们需要等待11年之久，等到这道闪光飞速穿过星际空间，直至最后一点余晖到达地球，人类才会开始四处传播“一颗恒星陨落了”的宇宙新闻。

贝塞尔根据测得的天鹅座61的距离计算出，这颗看似只是在漆黑夜幕中微微闪烁的亮点，实际上是一颗大光球，体积只比我们璀璨瞩目的太阳小30%，亮度也只是稍暗一点。这是对最先由哥白尼（Copernicus）阐述的“我们的太阳只是散布在广袤浩瀚的太空中的千万亿颗恒星之一”这一划时代观点的首次直接证明。

在贝塞尔之后，科学家又测量了大量恒星的视差。我们发现还有少数几颗恒星比天鹅座61离我们更近，其中最近的是南门二（半人马座中的最亮星），距离我们仅有4.3光年，它的大小和光度都与太阳十分接近。而绝大多数恒星都遥远到，即使我们将地球公转轨道的直径作为基线，都难以对其进行距离测量。[8]

此外，从耀眼的巨星到暗弱的矮星，不同恒星之间在大小和光度上的差异也很悬殊，例如，巨星参宿四（位于猎户座，距离我们300光年）的尺寸和光度分别是太阳的400倍和3 600倍，而矮星范马南星（距离我们13光年）[9]的尺寸则小于地球，光度也约为太阳的万分之一。

此时我们还要面对一个重要的问题，如何数出所有恒星的数目。相信你我都会理所当然地认为没有人能数出天上所有星星的数量，但正如其他的普遍看法一样，这也是大错特错的，至少，我们能够数出肉眼可见的恒星的数量。事实上，南北两个半球内，能够被肉眼看到的恒星总数只有6 000到7 000颗，而因为每次只有大约一半的恒星升到地平线以上，且靠近地平线的恒星的亮度会因被大气吸收而大幅削弱，所以我们最终在没有月亮的晴朗夜晚也只能用肉眼看到约2 000颗恒星。因此，倘若你以每秒1颗的速度不间断地数下去，只用花上大概半个小时就能全部数完了！

但如果用双筒望远镜观测，你能看到50 000颗恒星，而2.5英寸的望远镜能帮你看到1 000 000颗。倘若使用加利福尼亚威尔逊山天文台

的那台知名的100英寸望远镜进行观测的话，大约能看到5亿颗恒星之多。假使天文学家以每秒1颗的速度数它们，从黄昏到黎明整夜不歇，那也需要花上一个世纪才能数完！

当然，从未有人会蠢到想用大望远镜一颗颗地数恒星。天文学家是通过计数天空中一系列不同区域内可见恒星的总数，得到平均值，然后再推广到整个天空，从而估算出天空中恒星的总数量的。

一个多世纪前，英国著名天文学家威廉·赫歇尔（William Herschel）曾使用自制的大望远镜观测星空，他看到了银河——用肉眼看去只不过是一条在夜空中微微发亮的条带——中的大多数恒星，而那些恒星在平时只通过肉眼根本无法看到，他对此感到难以置信。正是因为他的观测，天文学才认识到银河并不仅仅只是弥漫在夜空中的一团星云或一条气体云条带，实际上，银河是由众多的、分布遥远的、通常暗弱到我们无法一一分清的恒星组成的。

通过更加强大的望远镜我们能够看到，银河中分散着比我们想象的数量更为庞大的恒星，但银河系的绝大部分仍然处于一片模糊之中。如果我们就此认为分布在银河区域中的恒星的密度要比天空中其他区域的恒星密度更大的话，那就错了。实际上，我们看到某片星空中的恒星分布密集，并不表示这片区域的恒星的分布密度就更大，它们很可能只是分布得更加深远。银河方向上的恒星一直延伸到我们用眼睛（包括使用望远镜的情况下）所能看到的极限，而其他方向上恒星并没有分布到我们目力所及的尽头，那些恒星的背后基本上就是空旷的宇宙空间。

我们看向银河时就仿佛看向一片密林，重重叠叠的树木构成了连续的背景，而在其他方向上我们能看到恒星间的一片片空隙，如同在树林中抬头看去，枝丫之间的一片片蓝天一样。

在星际宇宙中，恒星占据着太空中的一片扁平区域，在银河的平面上延伸很远的距离，但在垂直方向上却较为细薄，而我们的太阳只是这些恒星中的沧海一粟。

一代代天文学家通过更详细的研究得出结论：我们的星系共包含约40 000 000 000颗恒星，分布在一片直径约100 000光年、厚5 000到10

000光年的凸透镜状的范围内。这项研究的结论是对过去认为自己是宇宙中心的高傲的人类的一记响亮的耳光——太阳并非星际世界的中心，相反，它更靠近银河系的边缘。

在图111中，我们尝试告诉读者这一大群恒星的大致面貌。顺便一提，我还没说过，银河更科学的称谓应该是银河系（Galaxy，当然是拉丁语！）。图中将银河系的大小缩小到大约一万亿亿分之一，而表示恒星的点的数目也明显少于400亿，这只是出于印刷角度的考虑。

这一大团组成银河系的恒星拥有一个重要性质——它们都处于快速旋转中，如同我们太阳系中的行星一样。正如金星、地球、木星及其他行星都以近乎圆形的轨道围绕着太阳运转，组成银河的上千亿颗恒星也都围绕着所谓的银心（银河系中心）旋转。银河系的旋转轴心在人马星座的方向，而事实上，如果你循着云雾状的银河系环绕整个天空，你会发现，银河系在靠近人马座的地方会变得宽阔很多，那里就是这团凸透镜状的恒星集群最中心、最密集的部分（图111中的天文学家就在看向这个方向）。

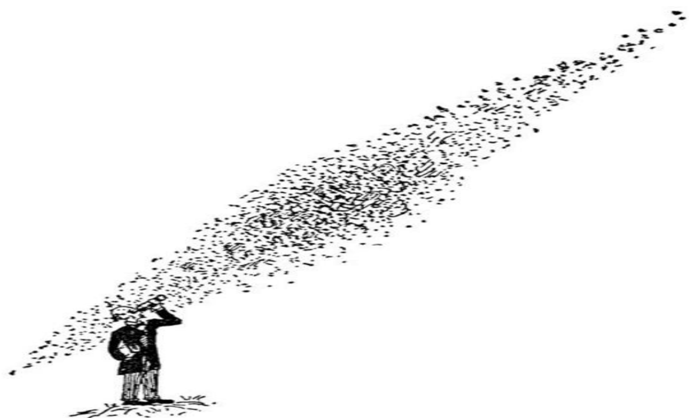


图 111

一位天文学家正在观测缩小了100 000 000 000 000 000比例的银河中的恒星系。他的头所在的位置大约是银河系中太阳的位置。

银心是什么样子的呢？对此我们并不知晓，因为很不幸，它被浓重的暗星际介质云挡住了。事实上，当你看向人马座方向较宽的银河系区域时[10]，你首先会认为是这条神话般的天路分叉成了两条“单行道”。

但那不是真正的分叉，你会产生这样的观感，单纯是因为星际尘埃和气体的暗云恰好悬浮在我们与银心之间。因此，银河两侧的黑暗，是因为那里确实空无一物、暗淡无光，而银河中心的黑暗，则是因为不透明的暗云遮挡了光线。在中央的暗色区域，只有少数恒星位于气体尘埃云前面靠近我们的方向（图112）。



图 112

我们无法看到太阳和其他上千亿颗恒星绕转着的神秘的银心的样子，这是件让人遗憾的事。但我们仍然可以通过观测相距银河系甚远的众多其他星系，来判断它应该长什么样。在我们的太阳系中，太阳统治着整个行星大家庭，但在星系中心却不是这样，那里并不存在一个控制着星系里所有成员[11]的超巨星。对其他星系中心区域的研究（我们将在后文讨论）表明，银心区域也包含大量的恒星，唯一不同的是，那里的恒星分布极为密集，比太阳系所在的外部区域要密集得多。如果我们将太阳系想象成一个由太阳统治的封建专制帝国的话，那么银河系就像是一个民主国度，一部分恒星成员占据着有影响力的中心位置，而其他的恒星则屈居于边缘区域。

如上所述，所有恒星，包括我们的太阳在内，都沿着一个巨大的圆形轨道围绕着银河系中心旋转。那么我们又该如何证明这一点呢？这些恒星的轨道半径有多大？旋转一整圈又要花多长时间呢？

所有的这些疑问都在几十年前被荷兰天文学家奥尔特（Jan Hendrik

Oort）解答了，他思考银河系中恒星运动的方法，与当初哥白尼思考行星运动的方法如出一辙。

请让我们先回忆一下哥白尼的思考方式。我们的祖先古巴比伦人、古埃及人等观测到，诸如土星和木星这样的大行星在天空中的运动呈一种很特殊的形式。它们似乎如太阳一样会在天空中划出椭圆形的轨迹，然后突然停下，逆向运行，再停下，返回原来的方向。图113的下部分简明地表示了两年间土星相对天空的位置变化（土星公转一圈的周期是29.5年）。因为一些宗教性质的偏见，地球被认为是宇宙的中心，而所有行星和太阳都被认为是围绕着地球运转的，所以土星的特殊运动被解释成：土星的轨道具有特别的形状，而且是一环套一环的。[12]

但哥白尼通晓得更多，他动用自己天才的头脑，将行星运行的诡异现象解释为：地球和其他行星都在围绕着太阳做简单的圆周运动。读者可以通过图113的上部分轻松理解这一论点。

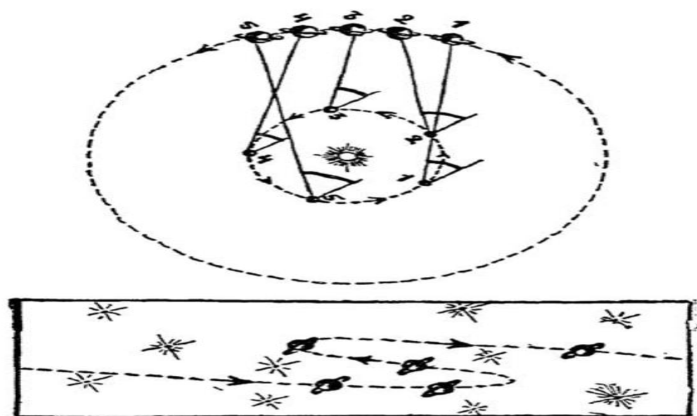


图 113

太阳在中心，地球（小球）沿着较小的圆形轨道运行，土星（带环）以相同的方向沿着更大的轨道运行。两组数字1、2、3、4、5分别表示地球和土星一年中在轨道上的不同位置，从地球上不同位置引出的垂线表示某颗固定位置的恒星的方向。将地球上每个位置与对应的土星位置相连，我们会发现，两个方向（地球到土星和地球到固定恒星）的夹角会先增大，随后减小，最后再次增大。因此我们知道，土星这种一环套一环的运动轨迹并不是因为它本身的运行轨道特殊，而是因为我们的地球同样在运动，二者的相对运动导致了不同的观测角度。

而奥尔特对于银河系中恒星的运动的说明可以通过图114来理解。图的下部是银心（被暗云团团覆盖！），在整个图画中有许多恒星围绕着它。三条圆弧表示三个与银心距离不同的恒星的轨道，中间的那条是太阳的轨道。

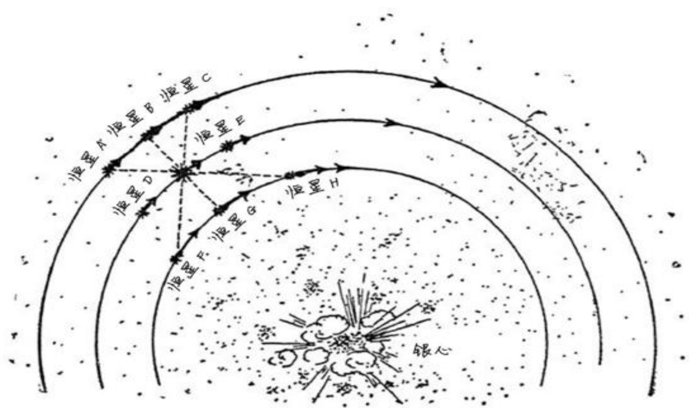


图 114

现在请仔细观察八颗恒星（图中的它们都带着光芒，以区别于其他恒星），其中有两颗在与太阳相同的轨道上运行，只是一颗在太阳稍前的位置，另一颗在稍后，另外六颗的位置分别在更大和更小的两条轨道上。我们必须记住一点，根据引力定律（参见第五章），越靠近边缘的恒星的运行速度越慢，越靠近中心的恒星运行得越快（这一点在图中用不同长度的箭头来表示）。

从太阳上看，或者从地球上看——当然这两种情况是一样的，这八颗恒星的运行是怎样的呢？这里我们说的是视线方向的运动（简称视向运动），可以通过所谓的多普勒效应[13]的方式来轻易观测到。首先，与太阳共轨、运行速度也与太阳相同的两颗恒星（记为D和E）对于日心观测者和地心观测者来说是静止的。两颗位于太阳与银心连线的延长线上的恒星（B和G）也是一样，因为它们与太阳平行运动，因而也没有视向速度。

那么位于外环上的恒星A和恒星C呢？从图中我们能够清晰地看到，它们的运动速度比太阳慢，所以恒星A一定会被太阳越甩越远，而恒星C则会被太阳逐渐追上。因为太阳与恒星A之间的距离会逐渐增加，与恒星C的距离会逐渐减小，所以来自恒星A、恒星C两颗恒星的光线必然会

分别显示出红移和蓝移的多普勒效应。对于内环上的恒星F和恒星H来说，情况刚好相反，恒星F会显示出蓝移，而恒星H则显示出红移。

如果恒星的确在做圆周运动，那么我们一定会观察到上述现象。如果圆周运动真实存在的话，那么我们不仅能证明上述中的红移和蓝移，还能由此估计出恒星轨道的半径和运动速度。奥尔特在收集了天空中所有可见恒星的视向运动的观测资料后，证实了恒星的红移和蓝移确实存在，从而毫无疑问地证明了，银河系的确在自转。

用同样的方法，我们还能得出银河系的自转会影响垂直于观察者视线方向的恒星的运动速度。尽管想要准确测量速度的这一分量难度很大（因为即便遥远的恒星拥有极快的线速度，体现在天体运动上也只是极其小的角位移），不过这一效应还是被奥尔特和其他天文学家观测到了。

通过精确测量恒星运动的奥尔特效应，我们获知了恒星的轨道和旋转周期，并计算出太阳围绕人马座中的银心旋转的半径是30 000光年，位于银心到银河系最边缘的大约三分之二处。太阳环绕银心一整圈大约需要2亿年，这显然是一段相当长的时间了，不过不要忘了，我们的太阳系的年纪大约是50亿岁，因此，太阳和它的行星家族在过去的生命中只完成了20次公转。如果参照地球年的定义，我们将太阳公转一圈的时间称为“1太阳年”的话，我们就可以说宇宙只有20岁。确实，在恒星世界中，一切都发生得很缓慢，太阳年显然是个计算宇宙历史的好单位！

3.迈向未知的极限

正如我们在上面提到的，银河系并不是空旷宇宙中的一座布满星星的孤岛。借助望远镜，我们发现深空之中还存在着其他的包含大量恒星的恒星团，就像我们的太阳所属的环境一样，其中离我们最近的一个是著名的仙女座大星云[14]，我们甚至用肉眼就看得到。它看上去是一团小小的、暗弱的细长星云。附录图版VIIA、图版VIIB展示了威尔逊山天文台的大望远镜拍摄的两张类似天体的照片，分别是后发座星云的侧向

图和大熊座星云的正向图。我们注意到，作为凸透镜状的银河系的一部分，这些星云的外观也具有相同的特点，都呈现出典型的螺旋结构，因而被称作“旋涡星云”。有许多证据表明，我们的银河系也是类似的螺旋形态，但身处其中的你我很难探明它的具体结构形状，事实上，我们的太阳很可能就位于银河大星云的一条旋臂的末端。

在很长一段时间里，天文学家都没有认识到旋涡星云其实是类似于银河系的星系，并将它们与普通的弥散星云（例如猎户座大星云）相混淆，认为它们都只是银河系中处在恒星之间的一大团星际尘埃云。不过后来有人发现，这一团雾状的螺旋形态的天体根本不是雾，而是由一颗颗恒星组成的，在最高放大倍率的望远镜下，我们可以分辨出其中的一个个小亮点。但这些恒星离我们实在太遥远了，以至于无法用视差测量得到它们的真实距离。

在测量天体距离的问题上，我们似乎已经黔驴技穷了。但是，我们绝不会就此停下！在科学研究中，我们遭遇的所有难以克服的困难只是暂时的，总会有新的发现帮助我们迈向更远的地方。对于这个难题，哈佛天文学家沙普利（Harlow Shapley）发现了一种全新的“量天尺”，也就是所谓的脉动恒星，或者说造父变星。[15]

星星的数量是无穷无尽的，它们大部分都在夜空中安静地发着光，只有少部分在不断地改变自身的亮度，由亮变暗，由暗变亮，循环往复。这些巨大星体仿佛心跳一样进行着规律性的脉动，这种脉动伴随着亮度的变化。[16]恒星越大，脉动的周期越长，就如同越长的钟摆摆动得越缓慢一样。体积较小的恒星（以恒星的角度比较）可在数小时内完成一次脉动，而真正的巨星则需要数年才能完成一次脉动。并且我们知道，越大的恒星其亮度也越大，因此我们推测，恒星的脉动周期与其亮度之间一定存在着明显的相关性。我们可以通过观测造父变星来揭示这种关联，因为它们距离我们足够近，我们可以轻易测得它们的距离和实际亮度。

如果你发现了一颗距离在视差测距的极限之上的脉动变星，你只需要通过望远镜观测这颗星，测得它脉动一次所需的时间，只要知道了这个周期，你就会知道它的实际亮度。再用这实际亮度对比你观察到的亮

度，你就能知道它距离我们有多远了。沙普利就是用这种机智的方法成功测量出了银河系中那些非常遥远的距离，并且这一方法在估计银河系的大致尺寸时也非常有效。

当沙普利使用这种方法测量仙女座大星云中的几颗脉动变星时，得到的结果使他大吃一惊：地球到这些恒星的距离，当然也就是到仙女座星云本身的距离，达到了1 700 000光年——这可比当时估计的银河系的范围要远多了！并且由此可以判断，仙女座星系的尺寸实际上只比我们的银河系小一点点。附录图版VII中展示的两个旋涡星云的距离则要更加遥远，它们的尺寸也和仙女座星云相近。

这一发现直接否定了“旋涡星云是银河系中的‘小东西’”这一说法，并且得出了一个新结论：旋涡星云是与我们的银河系类似的独立星系。现在应该不会有天文学家怀疑，生活在一颗围绕着组成仙女座星云的千亿颗恒星中的一颗旋转的小行星上的观测者，他眼中的银河系，应该同我们眼中的仙女座星云是一样的。

威尔逊山天文台的知名星系猎人——爱德温·哈勃博士（Dr. E. Hubble），对这些遥远的恒星社群进行了进一步的研究，他揭示出了一系列有趣而重要的事实。首先，他通过强大的望远镜观测得知，这些旋涡星系的数量实际上比恒星还多，而且，它们并不全是螺旋状的，有着各种各样的形态。比如，球状星系，看上去像普通的圆盘，具有弥散的边界；椭圆星系，其偏心率各不相同；而螺旋星系[17]本身也可以通过“旋臂缠绕的松紧程度”来区分。还有一种极为特别的星系形状，被称为棒旋星系。

有个极为重要的事实是，这些形态各异的星系可以排列成规律的序列（图115），基本对应着星系演化的不同阶段。[18]

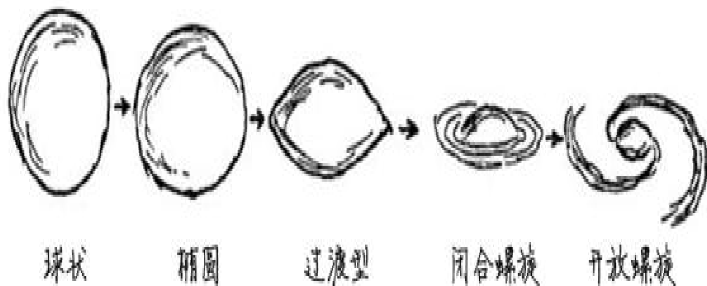


图 115

星系演化的各个阶段。

尽管我们在理解星系演化的细节上还有更远的路要走，但科学家猜测，这样的演化很可能是因为星系逐渐收缩而形成的。众所周知，缓慢旋转的气体球会持续稳定地收缩，随着旋转速度增加，它的形状也会越来越趋向于扁平的椭圆形。在收缩的某个阶段，当星系的极半径与赤道半径的比率达到$\frac{7}{10}$时，这个旋转体就必定会变为赤道处突出的凸透镜形状，随后的收缩，将进一步完善这一形状。最后，组成旋转体的气体开始沿着凸起的赤道向外扩散，最终在赤道面形成一层细薄的气体面纱。

英国著名物理学家和天文学家詹姆斯·金斯爵士（Sir James Jeans）利用数学方法，证明了上述关于旋转气体球的论述，他的证明方法也同样适用于我们星系这一巨大的恒星云。事实上，我们可以将这种由上千亿颗恒星组成的星团视作一团气体，其中的每颗恒星就是一个分子。

对比金斯的理论计算结果与哈勃基于经验对星系的分类，我们发现这些巨大的恒星社群的演化道路与理论所述的完全一致。尤其是我们发现，形状最扁平的椭圆星云对应的半径比率是$\frac{7}{10}$（E7），此时凸起的星系赤道上已经出现了明显的边缘。晚期演化出的旋臂，似乎是由初始星系快速旋转甩出来的物质形成的，不过直到现在我们也没法合理解释这些旋臂是如何形成的及普通的螺旋状和棒状螺旋又有何区别。

关于星系的结构、运动和恒星组成的进一步研究还有很多。例如，威尔逊山天文台的天文学家巴德（W. Baade）在几年前得到了一个很有趣的结论：虽然位于旋涡星系中心部分（核球）的恒星同组成球状星系和椭圆星系的恒星是同一类型，但位于旋涡星系旋臂中的恒星却属于另一类星族。这种“旋臂”类型的星族与中心区域的不同之处在于，其中出现了更多炽热、明亮的恒星，也就是蓝巨星，而这类恒星在旋涡星系中心区域和球状星系、椭圆星系中则很少见。因为我们稍后会看到（第十一章），蓝巨星很有可能是最近才形成的恒星，所以我们有理由推测，旋臂是孕育新的星族的温室。你可以想象一下，收缩的椭圆星系的赤道区域抛射出的大量物质是由原始气体组成的，它们在进入寒冷的星系际空间后凝聚为一团团大的物质块，进一步收缩后变成十分炽热而明亮的恒星。

在第十一章，我们将重新回到恒星诞生和生命周期的问题，不过现在我们必须着眼于星系在广阔宇宙中的大致分布情况。

首先我们必须说明，尽管基于脉动变星的测距方法在临近的星系效果极佳，但在更深远的太空中，这一方法就会失效，因为我们迟早会到达一个根本无法分辨出单颗恒星的遥远距离。在这种情况下，即使用最强大的望远镜观测，那些星系也只是一团细小的星云，我们只能依靠星系的可见尺度来判断其距离，因为星系间的尺寸差异并不像恒星的尺寸差异那么大，相同类型的星系尺寸都较为接近。就好像，如果所有人的身高都是一样的，没有巨人或矮人，那么你就可以通过目测对方的身高来判别他与你的距离。

哈勃通过这种估计距离的方法测量了遥远星系王国的距离，其结果证明，我们目力所及（包括最强大的望远镜）范围内的所有星系，基本上都是均匀散布在太空中的。我们说“基本上”是因为，常常会有一些星系成团，每个星系团内都包含上千个星系，就如同星系中的星团一样。

我们的银河系显然就是一个较小的星系团中的一员，这个星系团包括3个旋涡星系（包括银河系和仙女座星云）、6个椭圆星云和4个不规则星云（其中2个是大、小麦哲伦云）。

不过，除了这些偶然的聚团现象，根据帕尔马山天文台的200英寸

望远镜的观测结果，绝大多数星系仍是均匀分散在10亿光年范围内的太空中的。每两个邻近星系之间的平均距离约为5 000 000光年，在宇宙可见的边疆内，包含了大约几十亿个独立星系！

让我们沿用之前的比喻，如果将帝国大厦比作细菌，将地球比作豌豆，将太阳比作南瓜的话，那么星系就是分散在木星轨道范围内的上千亿颗南瓜，而那些星系群落就是一个个分散在直径略小于太阳到最近的恒星的距离的球形区域内的南瓜堆。想要找到合适的比例来类比宇宙的尺度是很困难的，即使将地球比作一颗豌豆，整个宇宙的尺寸也是一个天文数字！在图116中，我们试图告诉你天文学家是如何在探索宇宙尺度的问题上一步步前进的——从地球，到月球，到太阳，到恒星，到遥远的星系，再到未知的极限。

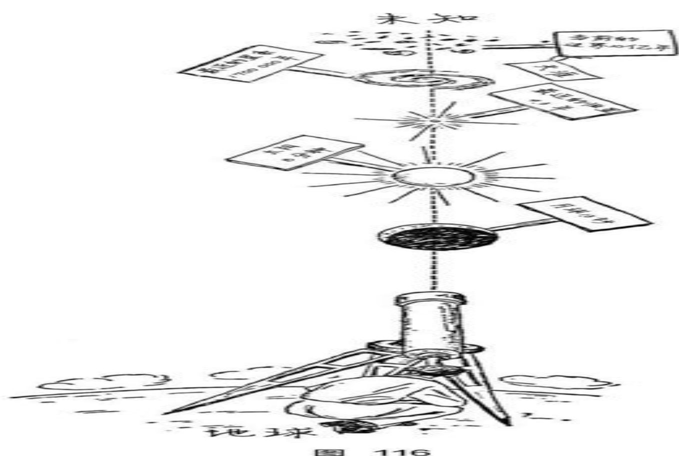


图 116

宇宙探索的里程碑，其中的距离以光年为单位。

现在我们已经准备好回答关于宇宙尺度的基本问题了。宇宙是无限的，还是有限的？当我们将越来越强大的望远镜伸向天空时，是能一步步发现更遥远的未知星空，还是终会遇到那最后一颗恒星？

当我们说起宇宙可能是“有限大小”的时候，当然不是指一位探索者在跨越几十亿光年之后就会遇到一面高墙，上面写着“此路不通”。

事实上我们在第三章中了解到，空间可以是有限而无边界的。它可以简单地弯曲实现“自我闭合”，因此，即使这位虚构的太空探索者开着他的飞船尽可能地沿直线（测地线）飞行，他最终还是会回到原点。

显然，这一情形就像古希腊一位探险家从自己的家乡雅典向西出发，在经历了长途跋涉后，发现自己最终走进了雅典的东门。

而且，就像我们不必环游世界，只需研究其中的一小片区域的几何性质就能获知地球表面的曲率一样，我们也可以使用同样的方法，通过现有的望远镜测量出宇宙的三维曲率。我们在第五章中了解到，务必要区分两种曲率：正弯曲对应有限的闭合空间，负弯曲对应马鞍状的无限开放空间（参见图42）。两种空间的区别在于，在闭合空间中，一定半径内均匀分布的物体数量增加的速度，要小于半径的立方，而开放空间则正好相反。

在我们的宇宙中，星系扮演的正是“均匀分布的物体”这一角色，因此，为解决空间总体曲率的问题，我们所要做的就是计数不同距离的星系数目。

这一计数已经由哈勃完成，他发现，星系数量的增加速度似乎要慢于距离的立方，这意味着宇宙空间是正弯曲且有限的。不过，值得注意的是，哈勃观测到的这种效应很小，只有在威尔逊山的100英寸望远镜的观测极限附近，这个效应才能被注意到，而最近，由帕尔马山那台新的200英寸反射望远镜观测的结果，也没有给这一重要问题带来光明。

目前关于宇宙是否有限的最终答案我们尚不确定，原因之一就在于遥远星系的距离只能借由可见亮度来确定（平方反比定律）。这一方法的前提是，假定所有星系产生的亮度都是相同的，但如果星系的亮度会受到年龄的影响，那么就很有可能导致错误的结果。实际上有一点我们需要记住，帕尔马山的望远镜能看到的最遥远的星系在10亿光年之外，因此对于我们来说，我们看到的是它10亿年前的样貌。如果星系在演化过程中逐渐暗弱（可能是因为其中一些活跃的恒星衰老死亡），哈勃得到的结论就必须加以校正。事实上，只要星系亮度在它10亿年的生命历程（大概只是它们一生的七分之一）中发生一点点变化，我们现在认为的宇宙是有限的结论就将被推翻。

因此，在最终确定宇宙是有限的还是无限的这一问题之前，我们还有很长的一段路要走啊。

[1] 此处的著作应为On the Heavens（译注）。

[2] 对跖点是指地球直径的两端，而对于美国来说，其对跖点就是地理位置与之相对的澳大利亚。另外，此处Antipodes直译为对跖点，另有一义是对澳大利亚和新西兰人的戏称，即澳新人（译注）。

[3] 1斯塔迪姆约等于157.5米（译注）。

[4] 在今阿斯旺水坝附近。

[5] 当今测得（WGS-84）的地球赤道周长为40 075.02千米（译注）。

[6] 纽约帝国大厦是当时的世界第一高楼，在本书成书时，其总高度为381米，后来又加装了天线（译注）。

[7] 1930年，美国天文学家克莱德·汤博发现了冥王星。2006年，冥王星被国际天文学联合会从行星行列中剔除（译注）。

[8] 现在因为观测设备和技术的发展，我们已经可以通过发射空间望远镜来观测更遥远的恒星的周年视差，例如2013年欧洲航天局发射的盖亚（Gaia）望远镜，在2018年释放的第二轮数据中就给出了13亿颗恒星的周年视差（译注）。

[9] 范马南星（Van Maanen’s star）是1917年由荷兰天文学家范马南发现的白矮星。范马南星位于双鱼座，是第一颗不是在多恒星系统中发现的白矮星，也是在人类目前所知道范围内，离地球第二近的白矮星，仅次于天狼星B（译注）。

[10] 初夏的晴朗夜晚最适宜观测。

[11] 本书成书时无论是对黑洞的研究还是对银河系的探测水平都远不如现在，因此作者并不清楚银河系中心到底有什么。当今的动力学、光谱探测等各项研究表明，银河系中心存在着一个超大质量的黑洞，它控制着整个银河系的旋转（译注）。

[12] 这里所说的是由古希腊天文学家托勒密发展成熟的地心说，

所谓的“一环套一环”，涉及的是地心说中描述行星轨道的均轮和本轮，这里不再赘述，有兴趣的读者可以自己了解。

[13]　参见331页中关于多普勒效应的探讨。

[14]　当时天文学界已经明确了星系与星云的区别（参考下文的说法），但在称谓上还未统一，因而下文中关于星系的“星云”一说请读者自行理解为星系，后不再提。仙女座大星云现称仙女座大星系，编号M31，是距离银河系最近的星系，当观测条件良好时，在北半球的秋季可以用肉眼看到（译注）。

[15]　这个名字源于造父一（仙王座β），是第一颗被发现存在脉动现象的变星。

[16]　读者不要将这种脉动变星与所谓的食变星混淆，后者周期性的亮度变化，是源于两颗互相绕转的恒星互相交食。

[17]　根据哈勃星系分类法，螺旋星系下分旋涡星系和棒旋星系（译注）。

[18]　在当时，椭圆星系被称为早型星系，旋涡星系被称为晚型星系，顾名思义，这是按照演化历程来命名的，表明椭圆星系更加年轻。但是现代的星系演化理论与此截然不同，现代理论大致认为，椭圆星系相较旋涡星系年龄更老，而旋涡星系也有可能会演化为椭圆星系（译注）。

第十一章 创世之日

1.行星的诞生

对于我们这些居住在七大洲（包括南极洲）的人来说，“坚实的土地”实际上就是稳定和持久的同义词。我们所考察的位于地球表面的这些熟悉的地貌——大洲和海洋、山脉和江河，似乎自古以来就一直存在。不过，历史地质学的研究资料表明，地球的面貌一直在改变，大洲中的大片陆地可能会被海洋吞没，而水下的区域也可能会升起变为陆地。

我们也知道古老的高山会逐渐被雨水冲刷磨平，而新的山脉会因为地壳活动拔地而起，但这些变化仅仅是我们这个巨大球体的固体外壳的变化。

不难看出，地球经历过一段没有固体外壳，只是一个发光的熔岩球的时期。而实际上，对地球内部的研究也揭示出，其中的绝大部分区域还是处于熔化状态，而我们张口就来的“坚实的土地”，其实只是漂浮在这团熔岩表面的一层薄膜罢了。能够证明这一结论最简单的办法就是：从地表开始向下测量温度，你会发现深度每增加1 000米，温度就会升高约30℃（或每1英尺增加16℉）。例如，在世界上最深的矿井（位于南非的金矿罗宾逊深井）内部，其侧壁的温度高到，必须装上一台空调设备才能避免矿工被活活烤熟。

按照这样的增长速率，地表以下50千米处的温度就已经达到了岩石的熔点（1 200~1 800℃），而这连地表与地心之间距离的1%都不到，在这之下的那些占据了地球质量97%的物质，必定完全处于熔化的状态。

显然，这种情况不会永久持续下去的，我们观测到，地球其实是从一个完全熔化的球体开始的，之后持续冷却，直到遥远的未来，整个地球，从表面到核心都会完全固化。根据地球冷却的速率和其固态外壳的生长速率大致估计，这一冷却过程应该自几十亿年前就开始了。

科学家在估算出组成地壳的岩石的年龄后，也获得了同样的数据。

尽管乍一看岩石没有表现出可以随意变化的特点（所以才有“坚如磐石”的说法），但实际上很多岩石中都包含一种“天然时钟”，对于富有经验的地质学家来说，这些“天然时钟”可以显示出它们从熔化状态到凝固之后经历了多长时间。

微量的铀和钍就是典型的能揭示年龄的“地质钟”，它们经常出现在地表和位于地下不同深处的各种岩石之中。如第七章所述，这些原子会自发地进行缓慢的放射性衰变，直到产生稳定的铅元素为止。

要获知含有这些放射性元素的岩石的年龄，我们只需测量千百万年来通过放射性衰变积累起来的铅的含量即可。

事实上，只要岩石还处于熔化的状态，放射性衰变的产物就会因液体扩散和对流离开它产生的位置。不过熔化的物质一旦凝固成岩石，由放射性元素产生的铅就会开始积累，所以我们能通过铅的含量得知这块岩石准确的年龄，就好像敌军间谍能够通过比较太平洋两座岛屿上散落的空啤酒罐的数目，获知海军陆战队在每座岛上的驻军时间一样。

近来，科学家通过改进的技术，精确测量了岩石中铅同位素和其他的不稳定化学同位素（如铷－87和钾－40）的沉积量，以此推测出，目前已知的最古老的岩石年龄大约是45亿年。因而我们可以总结出，大约50亿年前，地球的固态外壳开始从熔化状态逐渐凝固。

因此我们可以想象，50亿年前的地球是一个完全熔化的液体球，外面覆盖了一层稠密的大气层，包含空气、水蒸气和其他可能存在的强挥发性气体。

那么,这一大团炽热的宇宙物质是如何诞生的呢？是怎样的力量促使它形成，又是谁提供了铸造它的物质呢？有关我们脚下的这颗星球的形成及太阳系中其他行星的形成问题，是天体演化学（或称宇宙论，即宇宙起源的理论）这一门科学中的基本课题，也是萦绕在天文学家脑海中长达数个世纪之久的谜团。

1749年，法国知名博物学家布封在他的四十四卷著作《自然史》（Natural History）中，第一次尝试通过科学手段来解答这些问题。布

封认为，太阳曾与一颗来自星际空间深处的彗星碰撞，从而诞生了行星系统。他用想象力向我们描绘出一幅生动的画面：一颗拖着长长的明亮尾巴的“致命彗星”擦过当时孑然一身的太阳的表面，从它巨大的身躯上撕扯下大量小块的“掉落物”，这些小块物质由于撞击力的作用开始在太空中旋转（图117a）。

几十年后，德国著名哲学家康德提出了另一种关于行星系起源的截然不同的观点，他认为行星系是太阳自身创造的，而非其他的天体。在他的设想中，早期的太阳是一团巨大的冷气团，占据了现在行星系所处的全部空间，并沿着轴线缓慢自转。这个冷气团不断地释放辐射到周围的空间，导致自身持续冷却，并逐渐开始收缩，其旋转速度也因此而增加。由旋转产生的持续增长的离心力致使组成原始太阳的气体开始变得扁平，最终沿着赤道抛出一系列气体环（图117b）。普拉托（Plateau）在他的经典实验中实现了这种由旋转物质产生环的过程，他让一大滴油（不是原始太阳那样的气态）悬浮在另一种密度相同的液体之中，将其置入某种辅助机械设备中，使其开始快速旋转。当转速超过某个极限时，一圈“油环”开始在油滴周围形成。形成的环随后便会再破裂，分别凝聚成各颗“行星”，并在不同半径的轨道上围绕着“太阳”旋转。

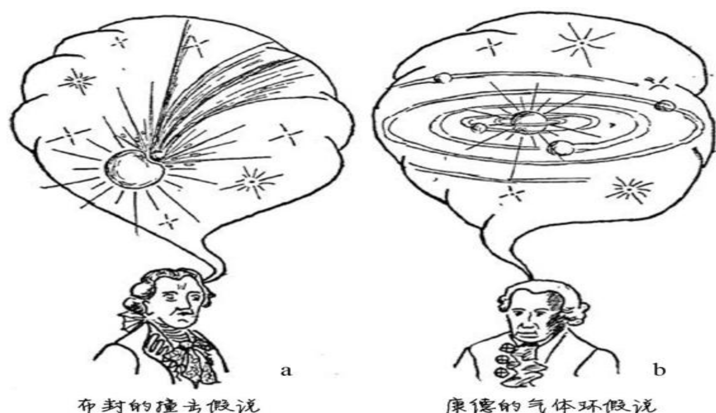


图 117

两种太阳系天体演化的派别。

这一观点随后被法国著名数学家拉普拉斯支持并发展，他在1796年出版的著作《对世界系统的解释》（Exposition du syètme du monde）

中描述了这一点。尽管拉普拉斯本身是一位数学巨擘，但他并未尝试用数学工具来解释这一观点，而仅仅是对这一理论进行了半通俗的定性讨论。

60年后，英国物理学家麦克斯韦（Clerk Maxwell）首次尝试用数学工具对这一观点进行解释，但他发现，康德和拉普拉斯的演化学说中存在着难以解释的矛盾：计算表明，如果现今发现的所有行星都是由均匀散布在整个太阳系空间中的物质凝聚而成的，那么当初的这些原始物质应该是广泛分散于空间中的。然而，倘若当时的这些物质真的如此分散，那么它们相互之间的引力将不足以使其凝聚成一颗颗的行星。因此，从收缩中的太阳中抛出的物质环应该会永远保持环的形态，就像土星环一样——土星环是由大量围绕着土星运转的细小粒子组成的，它们并没有显示出凝聚成一颗固态卫星的趋势。

解决这个困境的唯一出路是：假设原始太阳抛出的物质要比我们现在所见的这些行星多得多（至少100倍），其中的大部分最终落回到了太阳中，只有大约1%的物质形成了行星。

然而这样的假设又会走向另一条死胡同。如果一开始确实有这么多的物质以相同的速度与行星一同旋转，随后它们又落回太阳，那么它们应该会使太阳的旋转角速度比实际速度增大5 000倍。如果真的是这样，那么太阳应该每小时转7圈，而不是现在的大约每4周转1圈。

这些思考似乎宣判了康德–拉普拉斯观点的死刑，而天文学家希冀的眼光已经转向了别处，布封的撞击理论经由美国科学家钱伯林（T. C. Chamberlin）、莫尔顿（F. R. Moulton）和英国著名科学家金斯爵士的研究再一次焕发新生。当然，随着知识水平的提高，他们对布封的原始观点进行了修正。最初认为撞击太阳的天体是彗星这一观点被否定了，因为即使与月球相比，当时所知的彗星的质量也是小到可以忽略不计的。如今，这颗“侵犯了太阳的天体”被认为是另一颗与太阳在尺寸和质量上都接近的恒星。

在当时，改进后的撞击理论成了康德–拉普拉斯假说困境的唯一出路，然而这一理论依旧难以立足。由另一颗恒星猛烈撞击太阳抛出的碎片，最终像所有行星一样以近乎圆形的轨道运行而非椭圆形，人们对此

表示质疑。

为了摆脱这种困境，人们不得不进一步假设：一颗路过的恒星碰撞了太阳，行星就此诞生，此时，太阳被一团均匀旋转的气体层包裹着，这层气体促使原本椭圆形的行星轨道逐渐趋向规则的圆形。但是，行星周围的区域并不存在这样的介质，所以人们只得继续假设这层气体最终逐渐消散在了星际空间中，我们在日出前或者日落后，在太阳附近的黄道面方向看到的微弱光芒，也就是所谓黄道光，就是这些气体残留下来的部分。然而，这种由康德–拉普拉斯的太阳气体外壳假说和布封的撞击假说混合而成的理论自然是站不住脚的。不过正如俗语所言“两害相权取其轻”，行星系起源的碰撞假说也因此而被接受为正确的理论，直到最近仍出现在所有科学论文、教科书及通俗作品中，包括我自己的两本书《太阳的生与死》和《地球自传》中。

直到1943年秋，年轻的德国物理学家魏茨泽克（C. Weizsäcker）破解了行星起源理论的难解。他利用最新的天体物理学研究成果，成功消除了康德–拉普拉斯假说存在的疑团。顺着这条线索，我们完全可以建立起完整的行星起源理论，从而解释旧理论从未触及的关于行星系统的一些重要特征。

魏茨泽克的工作得益于近几十年天体物理学家对于宇宙中物质的化学组成有了完全不同的观念。过去大家普遍认为，太阳和其他所有恒星与地球一样，都是由相同比例的化学元素组成的。化学分析的结果告诉我们，地球主要是由氧（以各种氧化物的形式）、硅、铁和少量的其他更重的元素组成，轻元素气体，如氢和氦（以及其他所谓的稀有气体，如氖、氩等），在地球上的含量是极小的。[1]

因为缺乏更具说服力的证据，天文学家便假设在太阳和其他恒星内部这些气体的含量也很少。然而丹麦天体物理学家斯特劳姆格林（B. Stromgren）在对恒星结构进行进一步的理论研究后得出结论：上述假设完全是大错特错的，实际上在太阳的内部，至少有35%的物质是纯氢。随后这一估计值又提高到了50%。此外，他还发现太阳中纯氦的占比也很高。天体物理学家对太阳内部进行了理论研究[史瓦西（M. Schwartzschild）[2]最近发表的重要成果都是这个领域的最高水准]，

并对太阳表面进行了详细的光谱分析，最终得出一个令人震惊的结论：地球中最常见的化学元素在太阳上只占到太阳质量的1%左右，其余均为氢和氦，前者的比例略高一些。显然这一结果也适用于其他恒星。

此外我们知道，星际空间不是完全真空的，而是充斥着气体和微尘的混合物，平均密度为每1 000 000立方英里空间1毫克左右，并且这些弥散的、极其稀薄的物质显然也和太阳及其他恒星具有相同的化学组成。

尽管这些星际介质的密度极低，我们还是能够轻而易举地证明它们的存在，因为遥远恒星发出的光芒要跨越千百光年的路程才能进入我们的望远镜，在这个过程中，这些介质会对这些光芒选择性吸收。星际吸收线的强度和位置有助于我们更好地估计这些弥散物质的密度，同时也揭示出它们的成分——主要是氢，还包含一定量的氦。事实上，由细小粒子（直径约0.001毫米）组成的地球物质，只占到星际介质总质量的1%以下。

现在让我们回过头来重新看魏茨泽克理论的基本论点，我们会说“关于宇宙中物质化学组成的新知识对推进康德–拉普拉斯假说起到了直接作用”。实际上，如果包裹着原始太阳的气体层是由这些物质组成的，那么只有其中的很小一部分，即更重的地球物质可以被用来铸造地球和其他行星。其余部分，也就是那些无法凝聚的氢和氦，必然会因为某种原因消散——或是落回太阳，或是散逸到星际空间中。既然前一种可能性的结果，如上文所述，会导致太阳以更快的速度自转，那么我们只能接受另一种可能，也就是说，这些气态的剩余物质在地球物质形成行星后不久，就逐渐散逸到了太空中。

据此我们描绘出了下面的行星系形成图景。最初星际物质收缩形成我们的太阳时（参见下一部分），其中的很大一部分（大约是现存行星总质量的100倍），以巨大的包层的形式在太阳周围围绕、旋转（如此行为的原因明显是不同部分的星际气体以不同的旋转速度向原始太阳凝聚造成的）。这个快速旋转的包层由无法凝聚的气体（氢、氦以及其他含量更少的气体）和各种悬浮在气体中的地球物质（如铁的氧化物、硅的化合物、水滴和冰晶）的尘埃粒子构成。尘埃粒子相互撞击，像滚雪

球一样逐渐聚合、变大，形成大块的地球物质，也就是我们所谓的行星。图118描绘了尘埃粒子以相当于陨石的速度相互碰撞的结果。

基于逻辑推理我们得出结论：两块质量相近的微粒以这样的速度碰撞后，应当会双双粉身碎骨（图118a），不仅不会带来质量的增加，反而会摧毁大块物质。但当一个小的微粒撞上一块比它大得多的物质时（图118b），显然它会融进后者的身体里，从而形成更大质量的物质。

很明显，这两个过程都会导致小微粒的逐渐消失和更大质量物体的逐渐积累。如此继续下去，这个过程将愈演愈烈，因为大质量物体引力更大，会吸引更多靠近它的小微粒，从而继续增大自身的质量。图118c描绘了这一景象，我们能清楚地看到大质量物体捕获的效率更大。

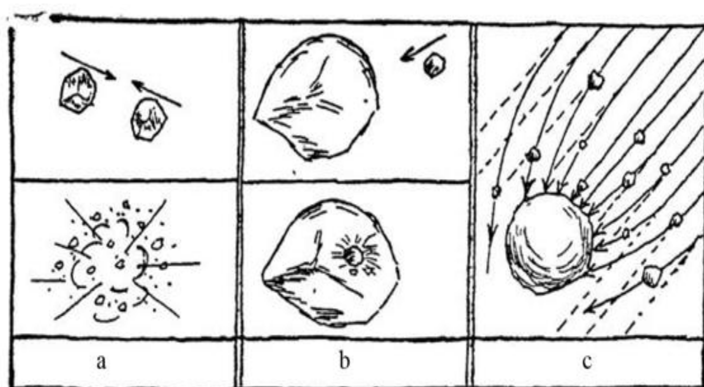


图 118

行星的距离

行星	到太阳的距离
水星	0.387
金星	0.723
地球	1.000
火星	1.524
小行星带	约2.70
木星	5.203
土星	9.539

天王星	19.19	
海王星	30.07	
冥王星	39.52	

魏茨泽克成功证明了，在这个由行星系统占据的空间内，曾经分散着大量的微小尘埃，它们在几亿年的时间中逐渐积聚成大团物体，最终形成行星。

这些行星在围绕太阳运行的同时还会吸聚大大小小的宇宙物质，从而使自身得以成长，其表面也会因为新物质的持续轰炸而变得炽热。但很快，随着星际尘埃、碎石和大石块不断减少，这些行星也随之停止增长，在它们向星际空间释放辐射的同时，它们的新生行星体表层必然会快速冷却下来，形成固态的外壳。随着内部的持续冷却，这层外壳也在不断增厚，直至今日。

行星起源学说需要解决的另一个重要问题是，解释行星与太阳不同距离的特殊规律[也就是大家熟知的提丢斯–波德定则（Titus-Bode rule）]。上页的表格中列出了九大行星与太阳之间的距离，同时还包括小行星带中的小天体——显然，它们是没能聚集成大天体的特殊小碎块。

土星卫星的距离

土星卫星	距离（以土星半径为基准）	前后距离间的比率
土卫一（美马斯）	3.11	
土卫二（恩克拉多斯）	3.99	1.28
土卫三（特提斯）	4.94	1.24
土卫四（狄俄涅）	6.33	1.28
土卫五（雷亚）	8.84	1.39
土卫六（泰坦）	20.48	2.31
土卫七（许珀里翁）	24.82	1.21
土卫八（伊阿珀托斯）	59.68	2.40
土卫九（菲比）	216.8	3.63

表格最后一列的数据有些引人注意。尽管数值上有些大小差异，但很显然，这列数字都接近2，由此我们总结出一条大致规律：每颗行星的公转轨道半径大约是前一颗行星的2倍。

更有趣的是，每颗行星的卫星之间也存在着类似的规律，从上表中给出的土星的九颗卫星之间的相对距离中，我们似乎可以窥见一二。

虽然在卫星的距离之比中存在一些偏差（尤其是土卫九），但我们仍然相信卫星间也一定存在着类似的关系。

现在我们需要解释另一个问题，为什么围绕太阳的原始尘埃云在积聚过程中没有最终只形成一颗大行星，而是形成了几个与太阳保持着特定距离的星体呢？

为解答这个问题，我们需要对原始尘埃云中发生的运动进行更详尽的调查。我们首先需要记住，所有物体——无论是尘埃粒子、小流星体或是一颗大行星——都服从牛顿运动定律，在椭圆轨道上围绕着太阳运行。假设形成行星的物质曾是（比如说）直径0.0001厘米左右[3]的粒子，那么当时必然有大约10^{45}个粒子在不同半径和偏心率的椭圆轨道上运行。显然，这样繁重的交通必然会导致大量粒子发生碰撞，其结果是，所有粒子的运动变得更加规律。事实上，这并不难理解，这些碰撞一定是要么使“交通肇事者”粉身碎骨，要么迫使尘埃粒子“迁移”到不那么拥挤的“交通道路”上去。

那么是什么规律在支配着这样“有组织的”，或者说至少部分是“有组织的交通”的呢？

为解决这一问题，首先请让我们选择一组公转周期相同的粒子，其中一些是在半径处处相等的圆形轨道上运行，其他的则是在多多少少有些扁的椭圆轨道上运行（图119a）。现在我们来尝试在一个以太阳为轴心、与粒子的运动周期相同的旋转坐标系（X，Y）的参照下，来描述这些粒子的运动。

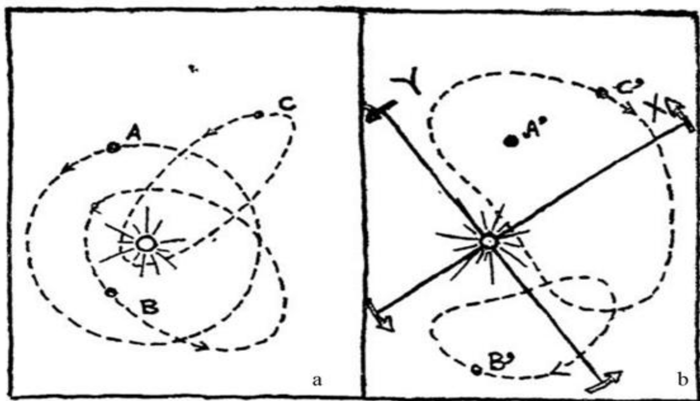


图 119

在静止坐标系（a）和旋转坐标系（b）参照下看到的圆形运动和椭圆形运动。

很显然，在这样一个旋转坐标系中，以圆形轨道（A）运行的粒子会完全静止在点A'上。粒子B以椭圆形轨迹围绕着太阳运行，时而靠近，时而远离。当靠近太阳时它的角速度会增大，远离时则减小，因此它有时会超越匀速旋转的坐标系（X，Y），有时又会滞后。不难看出，从这个坐标系的视角看，粒子B会划出一个蚕豆状的轨迹，在图119中记为B'。而另一个粒子C，则在偏心率更高的椭圆轨道上运行，以坐标系（X，Y）的视角来看，其运行轨迹类似于B'但范围更大，我们将其记为C'。

很明显，如果我们希望这一整群粒子永远不相互碰撞，我们就必须保证这些粒子在旋转坐标系（X，Y）中划出的蚕豆形状的轨迹不会相交。

另外还要记住一点，公转周期相同的粒子，它们与太阳之间的平均距离也一定相同。因此我们发现，在坐标系（X，Y）中，这些不相交的轨迹就仿佛环绕着太阳的一串“蚕豆项链”。

对于读者而言，上述分析可能有些难理解，但它所表述的实际上是一个很简单的过程，其目的就是向我们展示，与太阳保持相等的平均距离且因此具有相同公转周期的粒子，它们如何运行才能不相交。

在围绕太阳的原始尘埃云中，这些粒子与太阳的平均距离各不相

同，对应的公转周期也不同，因此其实际情况要更加复杂。显然，其中并非只有一串“蚕豆项链”，一定存在很多旋转速度各不相同的“项链”。在对情况进行细致分析后，魏茨泽克指出，为了保持稳定性，每串“项链”应该包含5个独立的旋涡系统，其整体的运动图景应当如图120所示。这样一来就可以保证每串项链内部的“交通安全”了。然而，由于这些“项链”分别拥有不同的公转周期，所以项链和项链之间一定会不可避免地发生“交通事故”。大量的相邻粒子环在其边缘区域相互碰撞，导致物质逐渐积聚，在与太阳的特定距离上形成大块物质团，且不断增长。因此随着单串项链逐渐变得稀薄，边缘区域的物质团越积越大，最终形成行星。



图 120

原始太阳包层中的尘埃“交通道路”。

上面有关行星系统形成过程的描述，简单地告诉了我们为何行星的轨道半径会遵循一定的规律。事实上，只要通过简单的几何推断就能得知，按照图120所示的图案，相邻“项链”的连续边界线半径构成了一个简单的几何级数，后者是前者的2倍。同时我们也可以看出为什么这一规律并非那么精确，因为实际上并非有什么严格的规律在决定这些粒子的运动，这一切只是尘埃粒子在进行不规律运行中表现出的一种趋势罢了。

这一规律同样适用于各大行星的卫星，这说明了卫星的形成过程和行星的形成过程大致是相同的。当太阳周围的原始尘埃云分散成一群群粒子，又最终凝聚形成行星时，同样的过程也在粒子群内部重复进行：

大部分物质聚集在中心形成行星，剩余的部分则环绕在其周围逐渐形成一系列的卫星。

谈论了许久尘埃粒子的相互碰撞和积聚成长，我们忘了介绍原始太阳包层中的那些气体发生了什么。要知道，它们可是占据了大约99%的质量，这个问题的答案相对来说更加简单。

当尘埃粒子相互碰撞，形成更大质量的物体时，那些气体无法参与这个过程，于是逐渐散逸到星际空间中。经过一系列较为简单的计算，我们可以得到这一消散过程所需的时间大约是100 000 000年，基本上与行星成长的周期相等。因此当行星最终成形之后，组成原始太阳包层的绝大部分氢和氦必然早已逃离太阳系，只剩下很少的一部分，即上文提到的黄道光。

魏茨泽克理论的一个重要结论是，行星系统的形成并非偶然事件，几乎所有恒星在形成时都会发生这一过程。这一论述与碰撞理论的结论截然相反，后者认为行星的形成在宇宙历史中是极其罕见的现象。事实上，按照碰撞理论的计算结果，恒星发生碰撞从而产生行星系统的确是极其罕见的事件，组成银河系的恒星有40 000 000 000颗，而在这几十亿年的历史中，这样的碰撞事件也只发生过几起而已。

按照现在的观点，如果每颗恒星都含有一个行星系统的话，那么单是我们的银河系中，肯定就有上百万颗物理条件与地球一致的行星。如果这么多的“宜居”世界都没有诞生出生命——甚至是最高形式的生命，那真是太奇怪了。

事实上，正如我们在第九章中所见，生命的最简单形式，比如各种病毒，其实不过主要是由碳、氢、氧、氮组成的复杂分子。这些元素在新生行星表面的含量必定很高，因此我们相信，终有一天，随着固态外壳的形成，大气层中的水蒸气凝聚成降水汇集到地面，那些必要原子一定会按照次序偶然组合成分子。当然，由于这些活性分子非常复杂，所以它们偶然形成的概率极低。打个比方，这就好像我们希望仅仅通过摇晃一盒七巧板，就使它们偶然组合成正确的形状一样。

而从另一方面来说，不要忘了，那些持续碰撞的原子的数量非常庞

大，而且几乎是无限期地持续碰撞，我们总能获得想要的结果。尽管看似不可能，但地壳形成之后地球上很快就出现了生命这一事实表明，复杂的有机分子确实有可能仅在几亿年的时间内就形成。一旦最简单的生命形式出现在新生行星的表面，随着繁殖和进化的逐渐进行，会有越来越复杂的生命形式出现。[4]其他“宜居”行星上的生命演化历程是否和地球一致，这一点我们还无法言说。对不同行星上的生命的研究会让我们从根本上理解进化历程。

也许在不远的将来，我们就可以乘坐“核动力太空船”前往火星和金星（太阳系中最“宜居”的行星，仅次于地球），去研究那里可能演化出的生命。至于千百光年以外的恒星世界中是否存在生命的问题，恐怕会是科学界永恒的未解之谜了。

2.恒星的私生活

在或多或少地了解了恒星完整的演化过程之后，我们现在可以问问自己，恒星本身是什么样的？

恒星的一生是怎样的？恒星诞生的具体过程是怎样的，在它漫长的生命中发生了怎样的变化，它的最终结局又将如何？

我们可以先从我们自己的太阳开始研究这一系列问题，毕竟它是组成银河系的千亿颗恒星中一位极具代表性的成员。首先我们知道，太阳并不年轻，因为根据古生物学的数据，它已经持续、稳定地燃烧了几十亿年了，它支持着地球上的生命繁衍生息。

没有任何一种普通能源能够支持如此长时间的能量释放，太阳辐射成了科学界最让人困扰的问题之一，直到元素的放射性嬗变和人工嬗变的发现，向我们揭示了潜藏在原子核深处的无比巨大的能量。我们已经在第七章中看到，基本上任何一种化学元素都可以视作潜在的、能提供巨大能量的“炼金术燃料”，当这些物质被加热到上百万度的温度时，这种巨大的能量就会被释放出来。我们在地面实验室里根本无法达到如此高的温度，不过，这种程度的高温在恒星世界里倒是极其常见。比如太

阳，虽然其表面温度只有约6 000℃，但越是向内温度就会越高，到达太阳核心时，温度已经达到了惊人的20 000 000℃。根据观测到的太阳表面的温度和已知的组成太阳的气体的导热性能，想要算出这一数据并不困难。同样的，我们也可以在不切开的情况下，计算出一块煮熟的土豆的内部温度，只要我们知道其表面温度和组成物质的导热性能即可。

结合有关太阳核心温度的数据和已知的各种核嬗变的反应速率，我们可以得知太阳内部的能量具体来自哪一种核反应。这一重要的核反应过程名为碳循环，由两位对天体物理问题很感兴趣的核物理学家贝特（H. Bethe）和魏茨泽克同时发现。

太阳释放的能量不仅仅局限于单个核嬗变过程，而是包含了一整条相互关联的热核反应序列，换句话说，就是反应链。对于这一系列反应，最有意思的一点是，它是一条闭合的环形链，每经历6个步骤便返回一次起点。图121简述了太阳反应链的过程，我们看到在这一序列中，主要参与者是碳原子核、氮原子核及与它们相碰撞的热质子。[5]

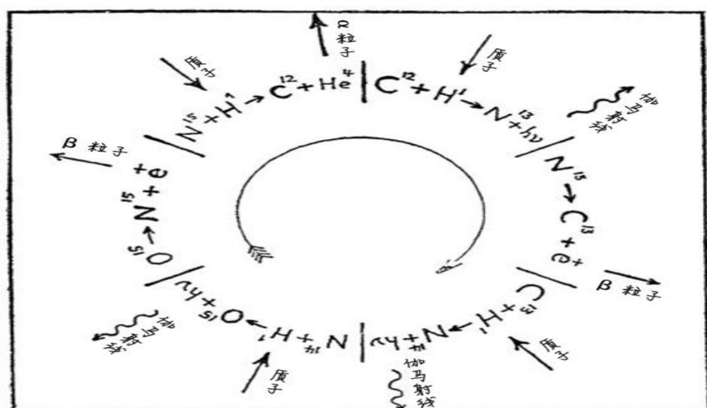


图 121

为太阳提供能量的核反应链。

我们不妨从普通的碳原子（C^{12}）开始。可以看到，它在与一个质子碰撞后，形成了氮的一种轻同位素（N^{13}），并以伽马射线的形式释放了一些亚原子能量。这一特定的反应对于核物理学家而言是相当熟悉的，他们在实验室环境下，使用人工加速的高能质子也能实现这一反应。N^{13}的原子核处于不稳定态，因而会释放一个正电子（或者说正β粒

子）来调节，变为碳的稳定重同位素（C^{13}），在普通的煤中就能找到少量的这种同位素。在被另一个热质子撞击之后，这个碳的同位素变为普通的氮（N^{14}），同时释放高能伽马射线。现在，N^{14}（我们的这一系列描述正是从这里开始的）的原子核又与一个（第三个）热质子碰撞，产生不稳定的氧同位素（O^{15}），随后很快释放正电子变为稳定的N^{15}。最终N^{15}再接受第四个质子的碰撞，分裂成两个不同的部分：一个是C^{12}，也就是回到了起点；另一个是氦原子核，或称α粒子。

因此我们看到，在环形链中，碳原子和氮原子是不断再生的，用化学家的话来说就是催化剂。反应链的直接结果就是，先后参与反应的4个质子变成了1个氦原子核，因而我们可以将整个过程描述为：高温下，由碳和氮催化的氢向氦的嬗变过程。

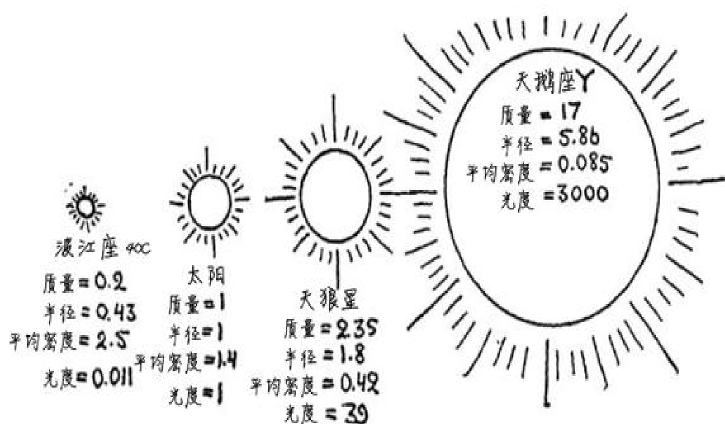
贝特证明了，在20 000 000℃的高温下，这样的反应链释放的能量与太阳辐射出的实际能量相同。既然其他所有可能的反应都与现有的天体物理证据不符，那么碳–氮循环就必然是太阳辐射能量的主要来源。另外需要注意的是，以太阳内部的温度，要完成图121中显示的整个循环需要约500万年的时间，因此在每个循环结束时，初始的碳原子（或者氮原子）都会以全新的姿态再一次进入下一个循环中。

鉴于碳在这个过程中所担任的基础角色，曾出现过一种原始的看法，认为太阳的热量来自煤。只是我们现在知道，太阳中所谓的“煤”，并非传统意义上的燃料，而是扮演着神话中浴火重生的凤凰这一角色。

值得注意的是，太阳中这种产能反应的速率是由它核心区域的温度和密度决定的，当然，也部分依赖于形成太阳的物质中氢、碳和氮的含量。由此我们可以立刻提出一种方法，通过调整反应物的配比，使其与观测到的太阳光度相符，从而分析出太阳中气体的成分。不久前，史瓦西就利用这一方法进行了计算，结果发现太阳中超过一半的物质是纯氢，纯氦的比例略少于一半，其他所有元素只占极小一部分。

我们对太阳能量来源的解释也可以很容易类推到大多数恒星上，最后得出的结论是：不同质量的恒星具有不同的核心温度，因而产能的速率也不尽相同。因此，质量只有太阳质量$\frac{1}{5}$的恒星波江座40C，它发出

的光的强度也约只有太阳强度1%；而重达2.5倍太阳质量的大犬座α（俗称天狼星），其发出的光的强度则是太阳的40倍。此外还有巨星，如质量是太阳的40倍的天鹅座Y380，其亮度比太阳高数十万倍。在上述所有的例子中，恒星质量与光度的关系都可以理所当然地总结为，在更高的核心温度下，碳循环的反应速率也更高。顺着这条主序恒星序列我们还发现，随着恒星质量增大，恒星的半径也在增加（从波江座40C的0.43倍太阳半径到天鹅座Y380的29倍太阳半径），而平均密度则在减少（波江座40C 的密度是2.5，太阳的密度是1.4，天鹅座Y380的密度是0.002）。图122中罗列了这几颗主序星的数据。



主序星。

除了这些由质量决定半径、密度和光度的“正常”恒星外，天文学家还在夜空中发现了一些全然不服从这一规律的恒星类型。

首先是那些被称为红巨星和超巨星的恒星，尽管它们拥有与“正常”恒星相同的质量和光度，但它们的尺寸却大得多。图123展示了一些这种反常的恒星，包括大家熟知的五车二、室宿二、毕宿五、参宿四、帝座和柱一（御夫座ε）。

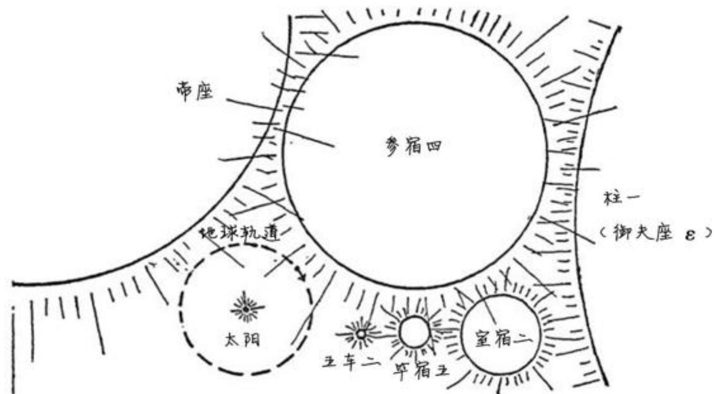


图 123

巨星和超巨星与太阳系的尺寸对比。

我们目前还无法解释导致这些恒星膨胀到如此巨大尺寸的内部力量是什么，这种神秘力量使得它们的平均密度远小于普通恒星。

与这些“浮肿”恒星的情况相反，我们还发现了另一种直径收缩到很小的恒星，其中一种被称为白矮星[6]，图124显示了它和地球在尺寸上的对比。“天狼伴星”几乎与太阳质量相等，但它的体积只是地球的3倍，这意味着它的平均密度是水的500 000倍！毫无疑问的是，白矮星是恒星演化的晚期阶段，此时恒星已经耗尽了其内部所有可用的氢燃料。

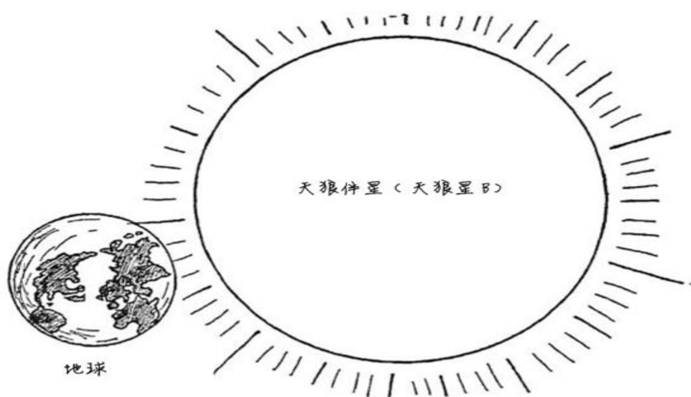


图 124

白矮星与地球相比。

如上文所说，恒星的生命源泉是氢缓慢嬗变成氦的“炼金术”反应。而一颗刚从弥散的星际介质中凝聚而成的年轻恒星，其内部氢的占比超过总质量的50%，由此我们可以想见它的一生将会是多么漫长。比如太阳，我们根据观测到的太阳亮度，计算出它每秒会消耗6.6亿吨氢，而太阳的总质量是2×10^{27}吨，其中有一半是氢，由此我们可以得出，太阳的一生大约有15×10^{18}秒，也就是大约500亿年！要知道，我们现在的太阳只有30亿到40亿岁，[7]还正年轻，它将以现在的强度继续闪耀数十亿年。[8]

更重的，也就是更明亮的恒星，其消耗氢的速率更快。例如，天狼星的质量是太阳质量的2.3倍，因而其内部氢燃料的含量是原始太阳的2.3倍，光度是太阳的39倍。也就是说，在相同时间内，天狼星消耗燃料的量是太阳的39倍，而它的燃料储量却只是太阳的2.3倍，因此，天狼星只需要30亿年就会耗尽全部的氢。而更亮的恒星，例如天鹅座Y（质量是太阳的17倍，光度是30　000倍），它的氢储备量则只能支持它燃烧不超过1亿年。

那么，当氢燃料耗尽后，恒星会发生什么呢？

显然，当支撑着恒星漫长生命的核能源耗尽时，恒星会开始收缩，并且密度越来越大。

通过天文观测，科学家揭示出了大量的这种“收缩恒星”的存在，它们的平均密度是水的几十万倍。这些恒星依旧十分炽热，极高的表面温度使它们闪耀着耀眼的白光，与主序恒星中普通的黄色或红色恒星差异明显。但因为这些恒星尺寸很小，所以它们的总光度也相应较小，只有太阳的数千分之一。天文学家将这种恒星演化的晚年阶段称为白矮星，“矮星”既是指它们的尺寸也是指它们的光度。随着时间流逝，白矮星的炽热白色星体会逐渐失去光芒，最终变为黑矮星，普通的天文观测很难看到这种大块的寒冷物质。

然而需要注意的是，耗尽了全部的氢燃料的年老恒星在收缩和逐渐冷却的过程中并非一直是安静和平稳的，这些垂死的恒星在生命的“最后一英里”蹒跚时，经常会发生极大的突变，仿佛在反抗自己的命运一样。

这些灾变事件，即所谓的新星和超新星爆发，是恒星研究中最令人振奋的话题之一。不过几天的时间，一颗曾与天空中其他恒星没什么两样的星体就会突然增亮几十万倍，它的表面温度也随之显著升高。随着亮度的突然提升，恒星的光谱也随之发生变化，科学家经过研究指出，在这一过程中，星体在迅速膨胀，它的外层以大约2　000千米每秒的速度在扩展。然而光度的增加只是暂时的，在达到一定程度之后，恒星便开始慢慢稳定下来。爆发后的恒星通常需要大约一年的时间才能恢复到原先的亮度水平，不过在这之后很长一段时间里，我们仍能观测到恒星辐射的微小变化。虽然恒星的亮度回到了正常水平，但这并不代表恒星的其他性质也与之前相同，一部分在爆发阶段快速膨胀的恒星大气仍会继续向外运动，使整颗恒星被包围在一层直径逐渐增大的明亮气体外壳中。目前我们还缺乏能够证明恒星的性质发生了永久变化的确切证据，因为在爆发前被我们拍摄到光谱的恒星只有一例（1918年的御夫座新星）。而且这张光谱照片上的信息也很不完备，无法帮我们确定恒星在爆发之前的表面温度和半径。

不过，我们可以直接观测所谓的超新星爆发，从而获得更准确的有关恒星爆发结果的信息。在银河系中，这种巨大的恒星爆发每几个世纪才发生一次（相比之下，常规的新星以每年约40个的速度发生），它们的亮度更是比普通新星高数千倍。在亮度极大时，这种恒星爆发释放的光甚至可以和整个星系的总亮度相比。1572年第谷·布拉赫观测到的能够在白天看到的恒星和1054年中国天文学家记录的“客星”，都是发生在银河系的超新星的典型代表，可能还包括伯利恒之星。

1885年，科学家观测到第一颗银河系外的超新星，发生在临近的仙女座大星云中，它的亮度比我们在银河系中观测到的任何新星都高1　000倍。尽管这种大爆发相对罕见，但近些年来对它们性质的研究已经取得可观的进展，这要归功于巴德和茨威基（Zwicky）的观测，是他们最先辨别出了两种爆发的巨大差异，并开始对遥远星系中出现的超新星进行系统性的研究。

尽管超新星爆发和普通新星之间的亮度相差巨大，但它们都显示出了相似的特性：两者在亮度上的快速增长及随后表现出的持续、缓慢的下降，都基本满足同一条光变曲线（只是比例不同）。如同普通的新星

一样，超新星爆发也会产生快速膨胀的气体外壳，只是质量更大。实际上，新星抛射出的气体外壳会逐渐变得稀薄，并很快消散在周围的空间中，而超新星释放的气体则会在周围形成明亮的星云。比如位于1054年超新星爆发位置上的蟹状星云，就是由爆发抛射出的气体形成的（见附录图版VIII）。

我们还找到了这个超新星爆发后残存的星体。事实上，我们在蟹状星云的最中心位置发现了一颗暗弱的恒星，根据观测到的性质，它应当被归类为一颗密度极大的白矮星。[9]

所有的这些都表明，超新星爆发的物理过程应当与普通的新星类似，只是规模更大。

在接受新星和超新星的坍缩理论之前，我们首先要问问自己，使整颗恒星快速收缩的机制会是什么？如今我们已经完全了解，恒星是处于平衡状态的大质量高温气体，由内部的炽热物质产生的高压维持着外观形状。随着上文所述的碳循环在恒星核心进行，恒星表面辐射的能量将会由内部产生的亚原子能量补充，恒星的状态几乎不会发生任何改变。但随着氢被耗尽，恒星缺乏内部亚原子能量的支持，必然会开始收缩，从而将重力势能转化为辐射。不过因为恒星物质的不透明度（即物质的传导率）极低，热量从内部传导到表面的速度很慢，所以引力收缩的过程也会很缓慢。以太阳为例，它需要花上超过1 000万年的时间才能收缩到现今半径尺寸的一半。任何加快收缩速度的企图都会释放出额外的重力势能，这又会升高太阳内部的温度和压力，从而减缓收缩的速度。从上述过程我们可以推断，使恒星收缩的速度变得同新星和超新星坍缩的速度一样快的唯一办法，是通过某些机制消除收缩过程中恒星内部释放的一部分能量。比如说，如果将恒星物质的不透明度降低至几十亿分之一，恒星收缩的速度也会随之加快相同的倒数倍，这样不出几天，恒星就会完成坍缩。但这一可能性很快被排除了，因为现有的辐射理论清晰地指出，恒星物质的不透明度显然是密度和温度的函数，哪怕只是使其降低十分之一或百分之一都是不可能的。

本书作者和他的同事沈伯格（Schenberg）最近提出了一种观点，他们认为恒星坍缩的真正原因是中微子的大规模生成，我们曾在第七章

中详细讨论过这种微小的核粒子。我们清楚地知道，中微子是移除收缩恒星内部过剩能量的不二之选，因为星体对于它而言就如玻璃窗之于光线，是透明的。现在的问题是，收缩恒星的内部是否产生了中微子，如果产生了，那么这些中微子的数量又是否多到能够带走大量的能量呢？

许多元素的原子核在捕获高速电子时，都伴随着中微子的释放。当高速电子进入原子核后，高能中微子便会被立即释放出来，同时，原子核因接受了电子而变为原子量相同的另一种不稳定原子核，并且这个新生成的不稳定原子核只会存在很短的时间，随后便开始发生衰变，释放电子和另一个中微子。最后整个过程重新开始循环，带来新一轮的中微子辐射（图125）……

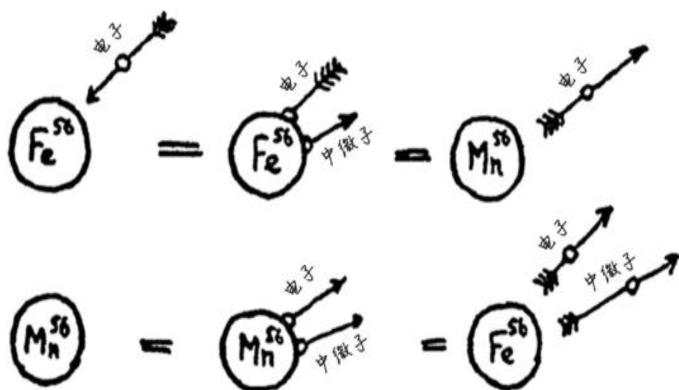


图 125

铁原子核中的乌卡过程（Urea process）[2]导致中微子无限制地生成。

如果温度和密度都足够高，就像收缩恒星内部那样，那么中微子将带走极其多的能量。例如在铁原子捕获和释放电子的过程中，经由中微子转化的能量就足有10^{11}尔格[10]/（克·秒）$^{-1}$。如果将铁换成氧（不稳定产物是衰变周期为9秒的放射性氮），那么恒星中的物质每秒失去的能量将多达10^{17}尔格/克。正因为氧原子的能量散失量如此之大，所以恒星完全坍缩只需25分钟。

由此我们发现，收缩恒星的炽热核心区域会辐射中微子这一说法，完全解释了恒星坍缩这一过程。

但有一点必须说明，尽管中微子耗散能量的速率可以轻易地估计出来，但对探索过程本身的研究还是面临着许多数学难点，因此我们现在只能给出定性的解释。

我们不妨设想一下，恒星内部的气体压力减小，那么它外部的巨大质量就会在引力的作用下开始向核心落下。然而，因为任何一颗恒星都在以或快或慢的速度旋转着，所以这一坍缩过程是不对称的，极区质量（即自转轴附近的物质）会率先下落，从而将赤道质量向外推（图126）。

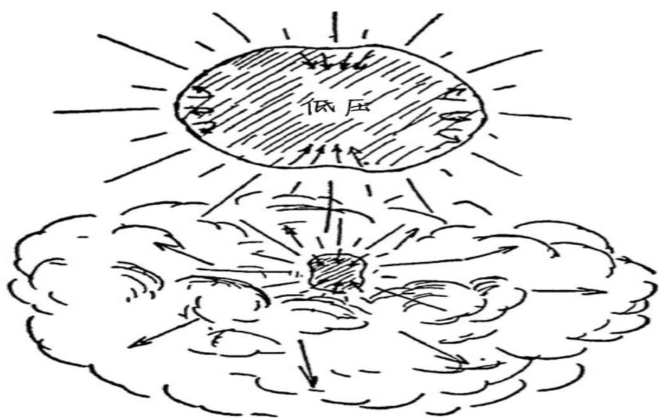


图 126

超新星爆发的早期和后期阶段。

这一过程将原本深藏在恒星内部的物质带出，并将其加热到几十亿度的高温，这样的温度会使恒星的光度骤然上升。随着过程的继续进行，恒星坍缩的物质凝聚在核心，形成了密度极大的白矮星，而被抛出去的质量最终会冷却，并继续扩散，形成类似于蟹状星云的弥散结构（所谓的超新星遗迹）。

3.原始的混沌和膨胀的宇宙

如果将宇宙视为一个整体，我们立刻会想到一个关键问题——它是否会随着时间而演化。宇宙是否永恒不变，一直处于我们现在所观测到

的状态呢？还是说宇宙一直在持续地变化着，经历了不同的演化阶段？

对此，基于各个科学收集、积累的信息，我们得到一个确切的答案：是的，宇宙一直在改变，它在很久以前的状态、如今的状态及它在遥远的未来将达到的状态，都是完全不同的。

并且，各个科学收集到的诸多事实进一步指出，我们的宇宙拥有一个明确的开始，它是在经过了持续的演化之后，才变为如今的状态的。如上文所言，我们的太阳系的年龄大约为几十亿年，这个数字在几个独立的问题中都已被证实。月球显然曾是地球的一部分，它是被强大的太阳引力撕扯下来的，这一事件也发生在数十亿年前。[11]

对恒星演化的研究（参见前面的部分）表明，我们如今能够在夜空中看到的绝大多数恒星，都已经有几十亿岁了。对恒星运动的普遍研究，尤其是对双星系统、三星系统及更复杂的恒星群体的相对运动的研究，将天文学家引向了这样的结论：这些星星存在的时间不会超过几十亿年。

宇宙中大量存在的各种化学元素会缓慢衰变，尤其是逐渐衰变的放射性元素，如钍和铀，这一事实从另一个角度为我们提供了证据。在经历了不断的衰变后，如果这些元素仍出现在宇宙中，我们就只能假设，要么是轻原子核至今仍在持续地产生这些元素，要么它们就是来自远古的遗留物。

基于有关核嬗变的现有知识，我们不得不放弃第一种可能性，因为即便是在最热的恒星内部，温度也从未高到足以“炮制”出重元素原子核的极高程度。事实上，我们在前面的部分已看到，恒星内部的温度为几千万度，而要想从轻元素中“炮制”出放射性原子核，所需的温度是几十亿度。

因此我们必须假设，重元素原子核是在宇宙演化过程中的某个阶段形成的，并且在那个特定的阶段，所有物质的温度都会达到令人生畏的高度，压力也是如此。

我们同样也能估计出宇宙的这一“炼狱”时期大致是在多久之前。我

们知道，钍和铀－238的半衰期分别是180亿年和45亿年，它们之所以还没有开始大量衰变，是因为它们现有的含量和其他稳定的重元素一样多。另外，铀－235半衰期大约只有5亿年，含量是铀－238的$\frac{1}{140}$。现今铀－238和钍的大量存在表明，这些元素一定是在几十亿年之内生成的，而铀－235的含量相对较少，因此我们能给出更准确的估计。事实上，如果这种元素的含量每5亿年减少一次，那么要经过大约7个这样的周期，也就是35亿年，它的含量才会减少为原来的$\frac{1}{140}$（因为$0.5\times0.5\times0.5\times0.5\times0.5\times0.5\times0.5=\frac{1}{128}$）。

利用核物理数据估算出的化学元素的年龄，与利用纯粹天文学数据估计出的行星、恒星及星群的年龄，两者完美契合！

但是，在万物刚开始诞生的那个时期，宇宙又是处于怎样的状态呢？时至今日，宇宙又发生了怎样的变化呢？

通过研究宇宙膨胀的现象，我们能够得出上述问题最完整的解答。在上一章中我们知道，宇宙的广阔空间中充斥着大量的庞大星系，我们的太阳只是其中的一个名为银河系的星系中上千亿颗恒星的一员。我们也知道，在目力所及（当然，是借助了200英寸的望远镜的情况下）的范围内，这些星系基本上是均匀散布在空间中的。

威尔逊山天文台的天文学家哈勃在研究这些遥远星系的光谱时注意到，它们的谱线都会向光谱的红端轻微移动，越遥远的星系，这个所谓的红移就越显著。事实上，哈勃发现，不同星系的红移量与它们的距离是成正比的。

解释这一现象最自然的思路是设想所有星系都在远离我们，距离越远，远离的速度越快。这一假设是基于所谓的多普勒效应：一个正在靠近我们的物体发出的光偏向光谱的紫端，而远离我们的物体发出的光偏向光谱的红端。当然，只有当光源与观测者的相对速度足够大时，我们才能观察到明显的偏移。一次，伍德教授（R. W. Wood）在巴尔的摩因为闯红灯而被捕，他告诉法官，因为多普勒效应，所以当他驾车靠近红绿灯时，看到的灯的颜色是偏向绿色的。当然他只是在愚弄法官而已。

如果法官多了解一些物理知识，他就会要求伍德教授计算出为使红灯变绿灯他驾驶的速度应该是多少，这样法官就能够以超速为由处罚他了！

回到星系红移的问题，乍看之下，这一现象似乎不太合乎逻辑。宇宙中所有的星系都在逃离银河系，难道银河系是一个星系级的弗兰肯斯坦怪物不成？如果这是真的，那么我们的银河系究竟拥有怎样的恐怖性质？它为什么不受其他星系欢迎呢？不过只要你多考虑一下，你就会意识到，并非银河系本身有什么不对，事实上，准确来说不是其他星系在远离银河系，而是所有星系都在相互远离。你可以想象一个表面涂有一个个圆点图案的气球（图127），当你吹胀它时，它的表面会拉伸得越来越大，而各个点之间的距离也会随之增加，从其中任何一个点的视角来看，其他的所有点都在“逃离”它。并且，在膨胀的气球上，不同点远离的速度也与它和参照点之间的距离成正比。

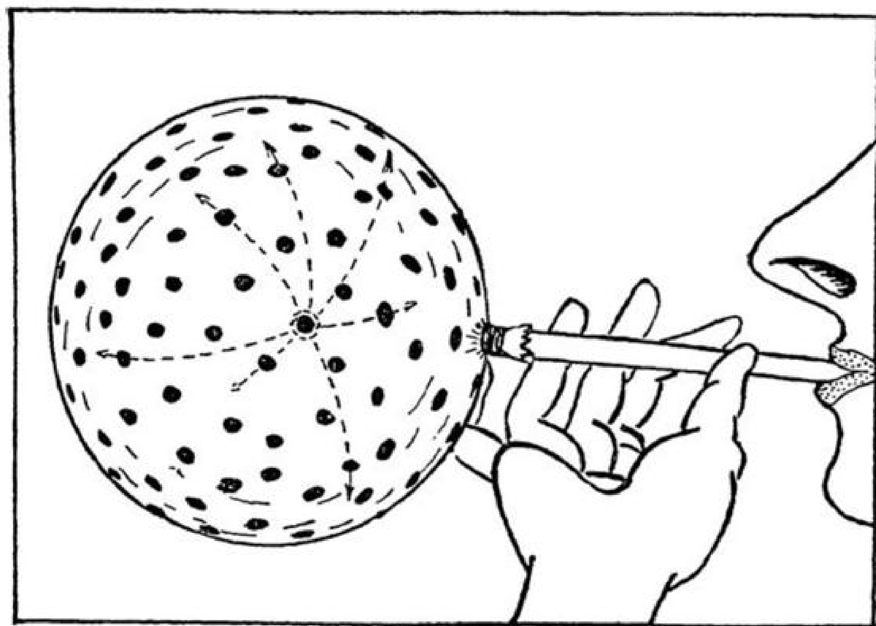


图 127

气球膨胀时，气球表面的点在互相远离。

这个例子很清楚地说明，哈勃观测到的星系退行现象与我们的银河系的特殊性质或位置没有任何关系，简单来讲，这是散布在宇宙空间中

的星系整体膨胀的结果。

通过观测到的膨胀速度及目前我们与邻近星系之间的距离，我们可以轻易算出，这场膨胀至少开始于50亿年前。[12]

在此之前，我们现在所说的星系，其实只是一团均匀分散在整个宇宙空间中的恒星云，如果更早一些，恒星本身也被紧紧地挤压在一起，与连续分布的热气体充斥着整个宇宙。时间再向前推移，我们发现气体的密度更大也更加炽热，这个阶段显然是各种化学元素（尤其是放射性元素）生成的时刻。再向前追溯，我们会发现整个宇宙的物质都被挤压成一种密度极大的超高温的核流体状态，就像第七章所描述的那样。

现在我们可以将这些观测结果整理出来，依照顺序来看一看在宇宙的演化过程中，都有哪些里程碑事件。

故事是从宇宙的胚胎时期开始的，此时，我们在威尔逊山天文台望远镜的极限视野下能看到的、如今分散在整个太空中的物质，都被压缩在一个大约只有8倍太阳半径[13]的球里。然而，这个极其致密的状态并未持续多久，因为快速膨胀使得宇宙的密度在最初的2秒内下降到只有水的密度的几百万倍，数小时后，这一密度更是下降到与水的密度相等。差不多与此同时，原本连续的气体破碎成了一个个独立的气体团，也就是如今的恒星的雏形。这些恒星受持续膨胀的影响而相互远离，随后破碎成一个个独立的恒星云，最终形成我们所说的星系，并继续互相远离，走向宇宙的未知深处。

现在我们或许会问，是何种力量导致了宇宙的膨胀，而这种膨胀会不会在某一日停止，甚至转变为收缩呢？膨胀的宇宙是否存在“浪子回头”的可能，将我们的银河系、太阳、地球及地球上的每一个人类都压回到致密的核流体状态呢？

根据现有的最权威的信息，这件事永远不会发生。很久以前，在宇宙演化的早期阶段，膨胀的宇宙冲破了一切束缚，以简单的惯性定律永不停歇地膨胀下去。这一束缚就是引力，它阻止宇宙中的物质四向分散。

举一个简单的例子来说明。假设我们从地表向行星际空间发射一枚火箭，当然，我们知道尚不存在这样的火箭，即使是著名的V2火箭也没有足够的推进力逃逸至自由空间[14]，它们在上升的过程中总是受到引力的束缚，最终被拉回地球。不过，如果我们能够推动火箭，使其以11千米每秒的起始速度发射（随着原子动力火箭的发展，我们终将达成这一目标），那么它就能够挣脱地球引力的拉扯，最终逃入自由空间，那时的它将会无拘无束地持续前进。11千米每秒的速度也因此被称为逃脱地球引力的“逃逸速度”。

现在我们来想象一枚在空中爆炸的炮弹，它的碎片分散向各处（图128a）。是爆炸产生的推力抵挡住了试图将碎片聚集在一起的引力，抛射出的碎片才会四向飞散的。不用说，这种情况下炮弹碎片之间的相互引力是微乎其微的，完全无法阻止碎片互相分散的运动。倘若这个力能更强一些，它就有能力阻止这些碎片飞散，迫使它们落向共同的引力中心了（图128b）。也就是说，这些碎片是会回落还是会飞向远处，是由它们运动的动能与相互之间的引力势能的相对大小决定的。

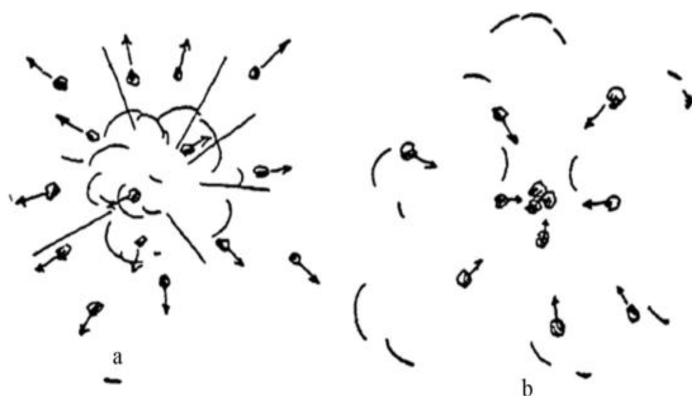


图 128

把炮弹碎片替换为一个个的星系，你就会得到前文所述的膨胀宇宙的景象了。唯一不同的是，宇宙中单个碎片星系的质量极大，引力势能能否大于动能就显得很重要了，[15]因此，宇宙膨胀的未来会如何，我们必须仔细研究涉及的两个量之间的关系，才能知晓膨胀宇宙的未来。

依据现今有关星系质量最确切的数据，似乎目前使星系后退的动能要比它们相互之间的引力势能高出几倍，由此可知，我们的宇宙会一直

膨胀下去，不存在被引力重新拉回的可能。不过要知道，我们目前掌握的关于整个宇宙的大部分数据都不是完全精确的，未来的研究很有可能会推翻这一结论。但就算膨胀的宇宙突然停下它的脚步，浪子回头，开始往回挤压，距离黑人诗歌里预言的“当群星坠落时”，我们被坍缩星系的千钧重量压得喘不过气来的糟糕时刻，还有几十亿年呢！

那么，是何种高爆物质让宇宙的碎片以如此之恐怖的速度四散而飞的呢？答案可能有些令人沮丧：或许并不存在通常意义上的爆炸。宇宙现在之所以仍在膨胀，是因为在之前的某个阶段（当然一切记录都已经消失殆尽了），它从无限大的尺度收缩为一个极其致密的状态，随后又重新扩张，从而产生了强大的内在弹力。这就好像，当你走进一间游戏室，刚好看到一只乒乓球从地面飞向空中，你马上就会得出结论（甚至不必多想）：在你进入房间之前，这个球必定是从某一高度落到地面，随后又因弹力而再度跳起。

现在我们可以尽情地放飞想象力，越过一切限制，扪心自问，当宇宙处于大挤压阶段时，现在所发生的所有事情是不是就会逆转？

当80亿或者100亿年前的你读这本书时，会从最后一页开始翻到第一页吗？那时的人们会不会从嘴里吐出炸鸡，并在厨房中赋予它们生命，再将它们送到农场，使它们从成年变为新生的雏鸡，最终爬回蛋壳中，几周之后变为新鲜的鸡蛋？有意思的是，这些问题我们无法从纯粹的科学角度回答，因为当宇宙挤压到最大程度时，一切物质将被压缩为均匀的核流体，此时过去的一切记录都将被抹去。

[1]　氢在地球上的最主要的存在形式是与氧结合成水分子。然而大家都知道，尽管地球表面的四分之三都被水覆盖着，但地球上的水的总质量占地球整体质量的比例还是相当小的。

[2]　德国天文学家、物理学家（译注）。

[3]　这是构成星际介质的尘埃粒子的大致尺寸。

[4]　关于我们星球上的生命的起源和演化更为详细的讨论可以参考作者的另一本书《地球自传》（纽约维京出版社，初版印于1941年，修

订版印于1959年）。

[5] 我们现在称这一核反应序列为碳氮氧循环（CNO cycle），它实际上发生在太阳质量恒星演化的晚期阶段，而现在太阳内部正在进行的核反应主要是氢燃烧形成氦的过程。另外，恒星物理中通常把核聚变过程称为“燃烧”，因此要注意将其与日常生活中燃烧区分开（译注）。

[6] 红巨星和白矮星的说法来自它们的表面与光度的关系。密度低的恒星表面积大，其内部产生的能量辐射到表面后温度较低，因而显示出红色。反之密度高的恒星其表面温度就会很高，呈现一种白热的状态。

[7] 根据魏茨泽克的理论，太阳形成的时间一定不会比行星系形成的时间早太多，并且现今估计的地球的年龄也是这样的量级。

[8] 当今天文学界认为，太阳的年龄约为50亿年，总寿命为100亿年，因此太阳目前正处于中年阶段。而且根据太阳的内部模型，太阳在之后的主序阶段光度会缓慢增强（译注）。

[9] 根据当前的观测和分析，1054年爆发的这颗超新星的残骸是一颗中子星。1932年中子被查德威克发现，随后朗道提出中子星存在的可能。1934年，巴德和茨威基提出超新星爆发可能会产生中子星，上文中也提到了他们的工作。但直到1967年，乔瑟琳·贝尔观测到脉冲星后，中子星的存在才被正式确认（译注）。

[10] 尔格是1达因的力使物体在力的方向上移动1厘米所做的功。1尔格＝10－7焦耳（译注）。

[2] 在天体物理学中，乌卡过程是发出中微子并被假定参与中子星和白矮星冷却过程的反应（译注）。

[11] 关于月球的起源有多种假说，例如撞击说、分裂说等。但是文中关于太阳引力扯下地球的一块的假说并没有科学依据（译注）。

[12] 根据哈勃的原始数据，两个邻近星系间的平均距离大约是170万光年（或1.6×1019千米），而它们互相远离的速度大约是300千

米每秒。假设膨胀速率是均匀的，我们可以得出膨胀的时间是$\frac{1.6\times10^{19}}{300}$$=5\times10^{16}$秒$=1.8\times10^{9}$年。而最近的信息表明，这一时间要更长一些。

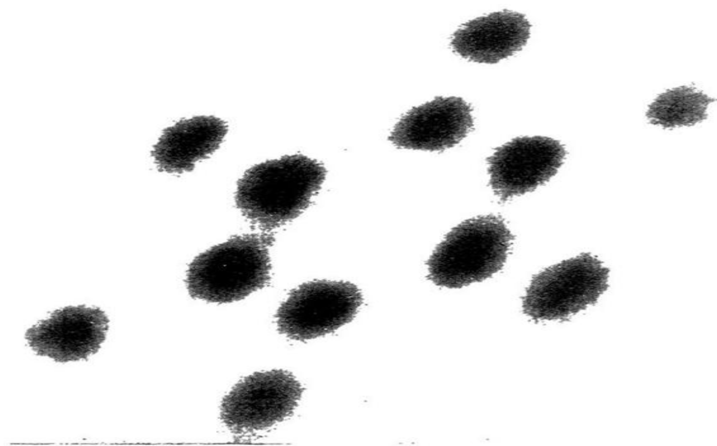
[13] 因为核流体的密度是10^{14}克每立方厘米，而现今宇宙中物质的平均密度是10^{-30}克每立方厘米，线性收缩率等于$\sqrt[3]{\frac{10^{14}}{10^{-30}}}$$\approx5\times10^{14}$。因此，现今的$5\times10^{8}$光年，在当时只有$\frac{5\times10^{8}}{5\times10^{14}}$$=10$回旋加速器的原理。回旋加速器主要包括两个置于强磁场（方向垂直于画面）中的半圆形金属盒。两个金属盒由一台变压器相连，并交替携带正电和负电。从中心位置的发射源射出的离子在磁场中沿环形轨迹运动，并在通过两个金属盒之间时得到加速。离子的速度越来越快，划出一道向外扩展的落线，最终以极高的速度飞出。$^{-6}$光年$=10\ 000\ 000$千米。

[14] V2火箭是纳粹德国在二战后期研制的一种导弹，是人类发明的第一种弹道导弹，也是后来的运载火箭和远程弹道导弹的先驱。它能够抵达近100千米的高度，是一种亚轨道飞行器。其主设计师冯·布劳恩后来投靠美国，研制了土星5号等著名的火箭。作者写作本书时尚未有能达到轨道高度的火箭，直到1957年苏联才成功发射了人类历史上第一颗人造卫星斯普特尼克1号，而能够脱离地球引力的载荷，在本书首次出版时也还未出现（译注）。

[15] 运动物体的动能与其质量成正比，而相互之间的引力势能与质量的平方成正比。

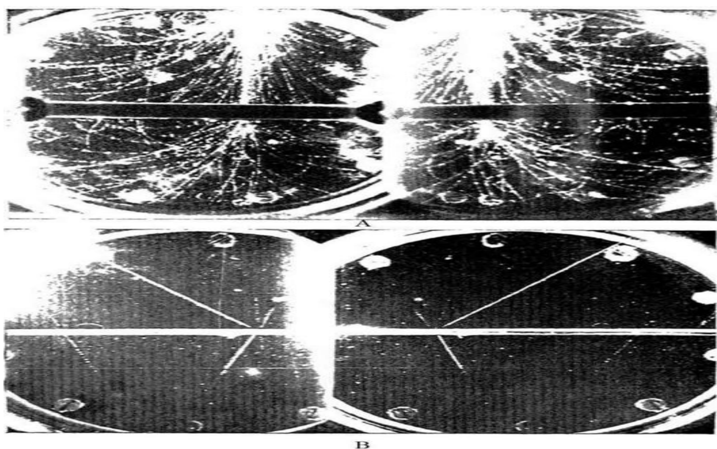
附录图版

图版 I



（伊士曼柯达实验室，M. L.赫金斯博士提供）

放大了175 000 000倍的六甲苯分子照片

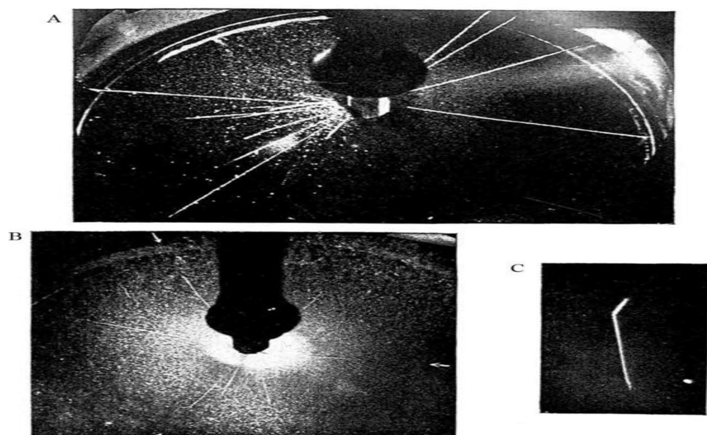


（加州理工学院，卡尔·安德森摄）

图版 II

A　起源于云室的外壁和中间的铅板的宇宙线簇射。正电子和负电子在磁场的作用下向相反的方向偏转。

B 由宇宙线粒子造成的原子核蜕变。



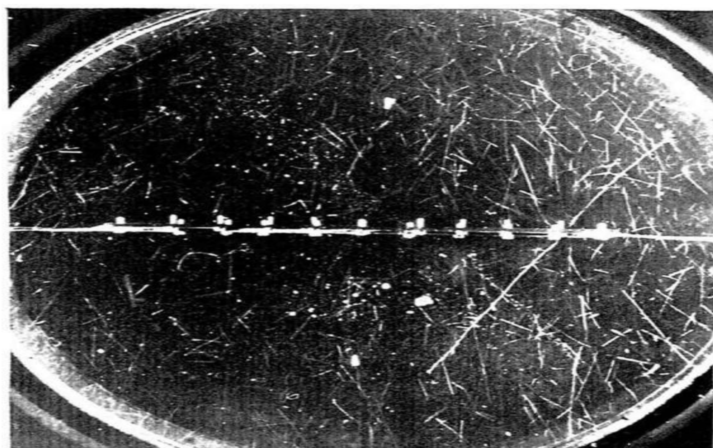
（迪伊博士和非泽尔博士摄于剑桥大学）

图版 III

A　充有重氢气体的云室中，一颗高速氘核轰击另一颗氘核，得到氚核和一个普通的氢原子核（${}_1D^2+{}_1D^2 \rightarrow {}_1T^3+{}_1H^1$）。

B　　　　　　　　一颗高速质子轰击硼核，将其分裂成三个相同的部分（${}_5B^{11}+{}_1H^1 \rightarrow 3{}_2He^4$）。

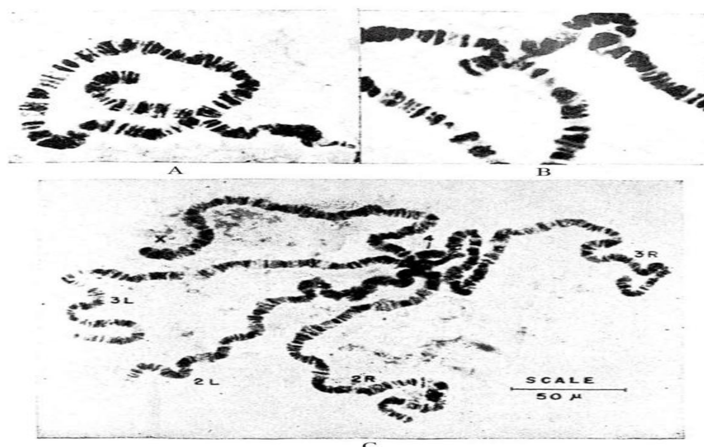
C一颗来自左侧的无法看到的中子击碎氮原子核，将其变为硼核（向上的轨迹）和一颗氦核（向下的轨迹），
（${}_7N^{14}+{}_0n^1 \rightarrow {}_5B^{11}+{}_2He^4$）。



（T. K. 包基尔德、K. T. 布罗斯多姆和汤姆·劳里森摄于哥本哈根理论物理研究所）

图版 IV

一幅显示了铀原子核在云室中裂变的图像。一颗中子（当然在图中是看不出的）击中横放在云室中央的薄铀箔中的一个铀核。两道轨迹分别对应裂变后的两个碎片飞出的方向，同时分别携带了约100MeV的能量。



（摘自《果蝇指南》，
M. 德梅雷克和B. P. 考夫曼1945年著，
华盛顿，华盛顿卡内基基金会。
经德梅雷克先生许可使用）

图版 V

A、B　　黑腹果蝇唾液腺染色体的显微照片，显示出反转和相互易位。

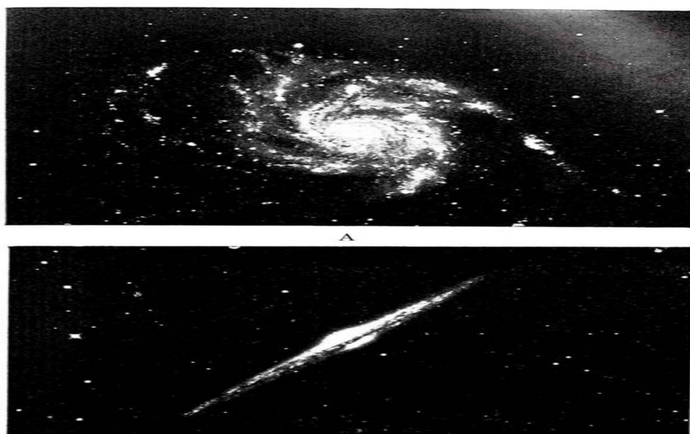
C　黑腹果蝇雌性幼体的显微照片。一对X染色体并排紧密配对；2L和2R是第二对相互配对的染色体，3L和3R是第三对，4是第四对。



（G. 奥斯特博士和W. M. 斯坦利博士摄）

图版 VI

活分子？这是放大了34 800倍的烟草花叶病毒粒子。这幅图像是用电子显微镜的方法拍摄的。



（威尔逊山天文台摄）

图版 VII

A 大熊座中的旋涡星云，是遥远宇宙中的一座孤岛。

B 后发座中的旋涡星云，是遥远宇宙中的另一座孤岛。



（巴德于威尔逊山天文台摄）

图版 VIII

蟹状星云。1054年被中国天文学家观测到的超新星爆发中抛出的膨胀气体外壳形成的星云。

版权信息

书名：从一到无穷大

作者：(美) 乔治· 伽莫夫著；陈子鹏译.

出版社：广东科技出版社

出版时间：2021年1月

ISBN：978-7-5359-7597-3

版权所有·侵权必究

紫图书库 大师经典 8030 031

最会说故事的科普书，令你读读读读读不停！

问：奇数、偶数、所有整数（包括奇数和偶数），这三种数哪一种的数量比较大？

答：一样大。虽然整数包括了奇数和偶数，但它们都是无穷的，所以是一样大的，你可以通过一一对应的方法得到这一结论。

问：已知天狼星到地球的距离为9光年，若你以光速驾驶飞船前往，再返回地球，中间不做停留，共需多长时间？

答：只需几个小时。如果你吃过早饭才出发，那么幸运的话，等你返回地球时刚好能赶上晚饭。

问：已知一年有365天，假设你有20个朋友，其中有两人或两人以上在同一天过生日的概率有多大？

答：54%。换句话说，如果你的朋友不止20个，但你从没在某一天同时被两个人邀请去生日聚会的话，要么是他们没有组织聚会，要么他们根本没有邀请你！

“我觉得您的新作不光很受欢迎，还非常有意思，深具启发性，我拜读过后受益良多……书中的每个章节都原汁原味，这样的独创性是本书非常令人称道的地方。”

——爱因斯坦



本书特色

拒绝枯燥！全书共配有120余幅作者亲手绘制的插图，让科学变得超级有趣！
数学、物理学、生物学、天文学、遗传学等各个科学领域的知识大融通！
沉浸式阅读体验，不知不觉在脑海中建立正确的物理观念，激发无穷好奇心！



上架建议：畅销·科普
ISBN 978-7-5359-7597-3
定价：59.90 元

Albert Einstein

The Special and the General Theory





$E = mc^2$

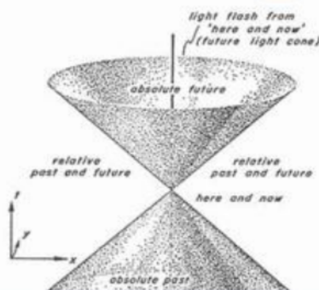
探索人类生命的
终极问题
现代物理学
最伟大的
基础理论之一

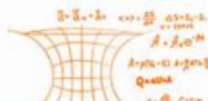
Relativity

相对论

狭义与广义相对论

[美] 阿尔伯特 · 爱因斯坦 / 著
李精益 / 译





畅销全球百年，影响人类进程的不朽科普经典

假如没有相对论，就没有 GPS 全球定位系统，也没有核电站发电……
激荡百年的头脑风暴，如今的知识标配

SPM 南方出版传媒
广东科技出版社 | 全国优秀出版社

目录

作者序
第十五版说明
第一部分：狭义相对论
1. 几何命题的物理意义
2. 坐标系
3. 时间
4. 伽利略坐标系
5. （狭义）相对性原理
6. 经典力学中所用的速度相加定理
7. 光传播定律与相对性原理表面上的抵触
8. 物理学中的时间观
9. 同时性的相对性
10. 距离概念的相对性
11. 洛伦兹变换
12. 量杆与钟在运动时的行为
13. 速度相加定理——菲佐实验
14. 相对论的启发性价值
15. 狭义相对论的普遍性结果
16. 经验与狭义相对论
17. 闵可夫斯基四维空间
第二部分：广义相对论
18. 狭义与广义相对性原理
19.重力场
20. 惯性质量和重力质量相等是广义相对性公设的—个论据
21. 经典力学和狭义相对论的基础在哪些方面无法令人满意？
22. 广义相对性原理的几个推论
23. 在转动参照系上的钟与量杆的行为
24. 欧几里得与非欧几里得连续区
25. 高斯坐标
26. 狭义相对论的时空连续体可视为欧几里得连续体
27. 广义相对论的时空连续体不是欧几里得连续体
28. 广义相对性原理的严格表述
29. 在广义相对性原理的基础上求解重力问题
第三部分：关于整个宇宙的一些思考
30. 牛顿理论在宇宙学上遇到的困难
31. 一个“有限”而又“无界的”宇宙的可能性
32. 以广义相对论为依据的空间结构
附录一
1.洛伦兹变换的简单推导
2. 闵可夫斯基四维空间（“世界”）
3.广义相对论的实验证实

（1）水星近日点的运动
（2）重力场对光的偏转
（3）光谱线的红向位移
4. 以广义相对论为依据的空间结构
5.相对论与空间问题
（1）场
（2）广义相对论的空间概念
（3）广义的重力论
附录二
.诺贝尔奖委员会给爱因斯坦的颁奖词

作者序

本书的目的，是尽可能使那些因一般科学和哲学的观点而对相对论感兴趣，但不熟悉理论物理的数学工具的读者，对相对论有一个正确的认知。本书假定读者已具备相当于大学入学考试的教育程度。尽管本书篇幅不长，但读者仍需要具有相当大的耐心和毅力。我力求以最简单易懂的方式来介绍相对论的主要概念，并大体按照其实际发生的顺序和联系来进行叙述。为了清晰起见，我不得不经常有所重复，而无法考虑文体是否优美。我严格遵照杰出的理论物理学家波尔兹曼（L. Boltzmann）的格言，即形式是否优美的问题应留给裁缝和鞋匠去考虑。但我不敢说这样已为读者解决了相对论中的固有难题。另一方面，我又故意采用“继母式的”（step-motherly）方式来论述相对论的经验性物理基础，以便不熟悉物理的读者不会感到像一个只见树木不见森林的迷路人。愿本书能为一些读者带来一段沉浸于思考的快乐时光。

爱因斯坦

1916年12月

第十五版说明

我在本版中增加了附录5（附录一第5节），其中阐述了我对一般空间问题，以及对我们的空间概念如何在相对论观点影响下逐渐改变的看法。我想说明：空间和时间未必能看成是可以脱离物质世界的真实客体而独立存在的东西。并非物质客体存在于空间中，而是这些客体具有空间广延性。如此看来，“一无所有的空间”（empty space）这个概念就失去了意义。

爱因斯坦

1952年6月9日

第一部分：狭义相对论

1.几何命题的物理意义

2. 坐标系

3. 经典力学中的空间与时间

4. 伽利略坐标系

5. （狭义）相对性原理

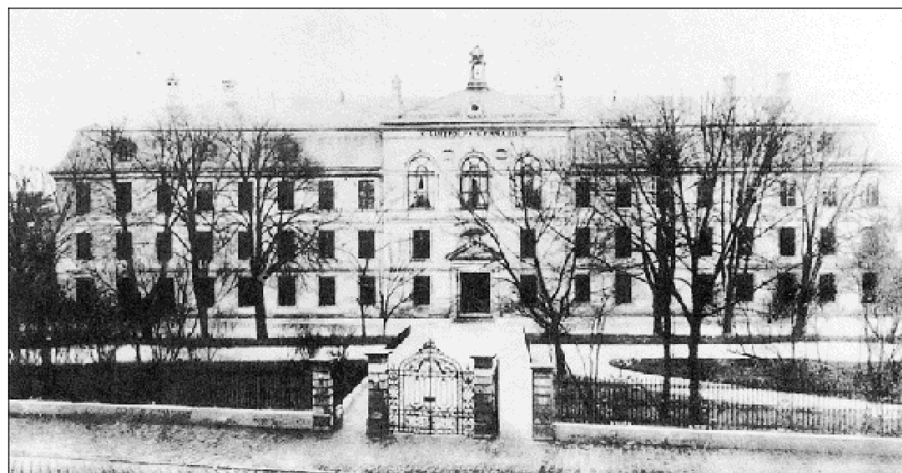
……

1. 几何命题的物理意义

本书大多数读者在学生时代就已经熟悉欧几里得几何学（Euclid's geometry）的宏伟大厦了，你们或许会以一种崇敬胜过喜爱的心情记起这座壮丽的建筑，而那些尽职的教师们曾花费无数时间，督促你们沿着这座建筑的高耸楼梯向上攀登。凭借过去的经验，谁要是质疑这门科学中哪怕是最冷僻的定理的真实性，你必定会投以鄙视的目光。但是假如有人问你："那么，你凭什么认定这些命题是真的呢？"你的这种骄傲感或许马上就会消失。让我们思考一下这个问题。

几何学从平面、点和直线等概念出发，我们可以将它们与大致上确定的概念联系起来；同时，几何学还从一些简单的命题（公理）出发，由于这些概念，我们倾向于将命题视为"真理"。然后，通过一种我们认为正确的逻辑推理过程，其余的命题都可由这些公理推导出来，也就是说，这些命题已得到证明。于是，只要一个命题是以公认的方法从公理推导得出的，它就是正确的（就是"真实的"）。这样，单一命题是否"真实"的问题就归结为公理是否"真实"的问题。但人们早就知道，上文的问题（如何认定这些命题是真的呢？）不仅无法用几何学的方法来回答，

而且问题本身也是完全没有意义的。我们不能问“通过两点只有一条直线是否真实”这样的问题。我们只能说：“欧几里得几何学研究的是‘直线’，每条直线都具有由其上两点决定的性质。”“真实”这一概念与纯粹几何学的观点并不相符，因为我们总习惯将“真实”一词与一个“实在的”客体（object）相对应；可是，几何学并不涉及其中包含的观念与经验客体间的关系，只涉及这些观念本身之间的逻辑联系。



1889年，慕尼黑鲁伊特波尔德中学（Luitpold Gymnasium）。爱因斯坦曾在这里上学，那时候德国的中学更重视人文科学而不是科学与数学，爱因斯坦在这里经常受到打击。

尽管如此，仍不难理解为何我们不得不将这些几何命题称为“真理”。几何概念大体上与自然界中的“精确”（exact）客体相对应，而这些客体是产生几何概念的唯一根源。几何学应避免依循这一途径，以便能使其结构获得最大限度的逻辑一致性。例如，通过查看一个实质刚体（practically rigid body）上两个带记号的位置以决定距离的方法，已经根深蒂固于我们的思考习惯中了。假如我们适当选择观测位置，用一只眼睛观察而能使三个点的视位置相互重合，我们也会习惯认为这三点位于一条直线上。



爱因斯坦的父亲赫尔曼·爱因斯坦（Hermann Einstein）不善经商，但喜爱德国文学，并经常鼓励爱因斯坦在数学上的兴趣。

假如，依照我们的思考习惯，在欧几里得几何学的命题中补充一个命题，即一个实质刚体上的两点永远对应于同一距离（线间距，line-interval），而与我们对刚体位置的任意改变无关，那么欧几里得几何学的命题就归结为实质刚体的所有相对位置的命题。1这样补充后的几何学可被视为物理学的一个分支。现在我们就可以正常地提出通过这种方式诠释的几何命题是否为“真理”这一问题：因为我们有理由问，对那些与我们的几何观念相联系的真实物体而言，这些命题是否可以被满足？用不太精确的措辞来表达，上面这句话可以这样表述：我们将这种意义

的几何命题的“真实性”理解为：此命题对于用直尺和圆规作图的有效性。

当然，用这种意义来断定几何命题的“真实性”，只是基于不太完整的经验。不过，我们先假定几何命题的“真实性”，在后文中（在论述广义相对论时）我们将会看到这种“真实性”是有限的，并且将讨论这种有限性的范围。

1 由此推论，一个自然客体也与一条直线相联系。一个刚体上的三个点A、B和C，假如已给定A和C，而B点的选择使得AB和BC之和为最小，则此三点位于一条直线上。这一不完整的提法能够满足我们目前的讨论。

2. 坐标系

根据前文已说明的关于距离的物理解释，我们也能够用度量的方法来确立一个刚体上两点间的距离。为了实现这一目的，我们需要一个可以一直作为度量标准的“距离”（杆S）。现在，假如A和B是一个刚体上的两点，我们可以按照几何学的规则作一条直线连接这两点；然后，以A为起点，一次一次地记取距离S，直到到达B点为止。所需记取的次数就是距离AB的数值度量（numerical measure）。这是一切长度测量的基础。2



爱因斯坦的母亲宝琳娜·内·科赫（Pauline nee Koch）是一位有才华的钢琴家。她鼓励两个孩子勤奋学习，对他们充满信心。

描述一起事件（event）发生的地点或一个物体在空间中的位置，都是以能够在一个刚体（参考物体，body of reference）上确定一个与该事件或物体重合的点为依据。这种方式不仅可用于科学描述，也可用于日常生活。假如我来分析“北京天安门广场”[3]这一位置标记，可以得出以下结论：地球是该位置标记所参照的刚体；“北京天安门广场”是一个明确规定的点，并已被命名，而考虑的事件则在空间中与此点重合。[4]

这种标记位置的方法只适用于刚体表面的位置，并以刚体表面上存在的可相互区别的各个点为依据。但我们可以摆脱这两种限制，并且不改变位置标记的本质。例如，有一朵云飘浮在北京天安门广场上空，我们可以在北京天安门广场上垂直地竖起一根竿子直达这朵云，以此来确定这朵云相对于地球表面的位置。用标准量杆度量这根竿子的长度，并

结合竿子下端的位置标记，我们就可以得到这朵云的完整位置标记。根据这个例子，我们可以看出位置的概念是如何进行改造的：

（a）我们设想将确定位置所参照的刚体进行补充，补充后的刚体延伸至我们需要确定位置的物体。

（b）在确定物体的位置时，我们使用一个数（此处是用量杆量出的竿子长度）而不用选定的参考点（designated points of reference）。

（c）即使没有竖立高达云端的竿子，我们也可以得到云朵的高度。我们从地面上不同的位置以光学方法观测云朵，并考虑光传播的特性，就能够确定原本需要达到云朵的竿子长度。

Albert Einstein

Mes projets d'avenir.

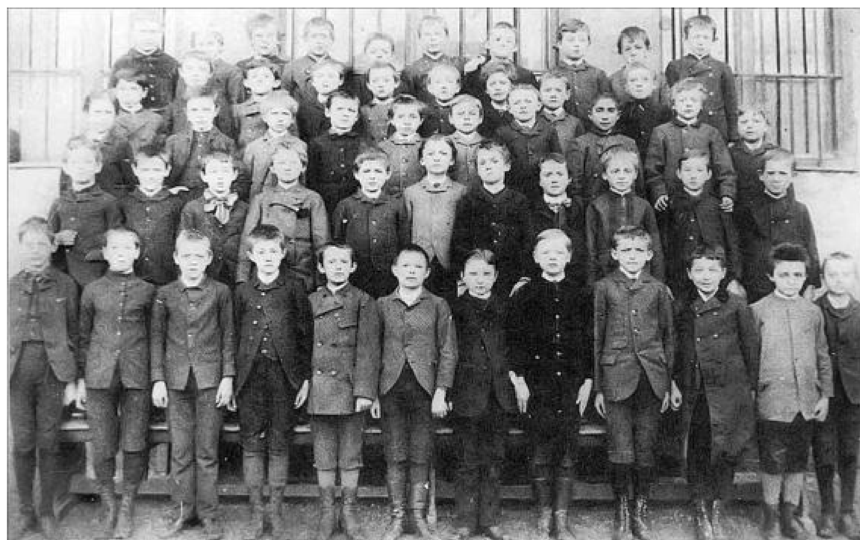
Un homme heureux est trop content du présent de la présence pour penser beaucoup à l'avenire. Mais de l'autre côté ce sont surtout les jeunes gens qui aiment à s'occuper de hardis projets. Du reste c'est aussi une chose naturelle pour un jeune homme sérieux, qu'il se fasse une idée aussi précise que possible du but de ses désirs.

Si j'avais le bonheur de passer heureusement mes examens, j'irai à l'école polytechnique de Zurich. J'y resterais quatre ans pour étudier les mathématiques et la physique. Je m'imagine (de) devenir professeur dans ces branches de la science naturelles, en choisissant la partie théorétique de ces sciences.

1896年9月，爱因斯坦在他毕业考试的法语作文中写出了他对未来的计划："如果能顺利通过考试，我将到苏黎世联邦理工学院攻读数学和物理。"

从以上论述，我们可以看出：假如在描述位置时，我们可以使用数值度量，而不考虑参考刚体上是否存在着（具有名称的）标记位置，那就会更加方便。在物理测量中，可以应用笛卡尔坐标系（Cartesian system of co-ordinates）来达到这个目的。笛卡尔坐标系包含三个相互垂直的平面，它们牢固地附着于一个刚体上。在一个坐标系中，任何事件发生的地点（主要）由从事件发生的地点向这三个平面所作垂线的长

度或坐标（x、y、z）来确定。这三条垂线的长度，可以按照欧几里得几何学确立的规则和方法，用刚性量杆经过一系列操作来进行确定。事实上，构成坐标系的刚性平面一般并不存在；此外，坐标的大小实际上不是用刚性量杆的结构，而是用间接的方法来进行确定。假如要获得清晰的物理学和天文学结果，就必须始终按照上述论述来寻求位置标记的物理意义。5



1889年，慕尼黑鲁伊特波尔德中学学生合影，52个男生中只有爱因斯坦（第一排右三）露出了一丝笑容。

于是，我们得出以下结论：对事件在空间中的位置所进行的每一种描述，都必须使这些事件参照一个刚体，得出的关系是以假定欧几里得几何学的定理适用于“距离”为依据，“距离”在物理上按惯例表示为一个刚体上的两个标记。

2　此处我们假设没有任何剩余部分，即量度的结果取整数。我们可以用具有分刻度的量杆（divided　measuring-rod）来克服这一困难，引进这种量杆并不需要对量度方法做任何根本性的改变。

3　原作者以德国柏林的波茨坦广场（Potsdamer　Platz）为例，英译者改为伦敦特拉法加广场（Trafalgar　Square），为便于中国读者阅读，故改为此地名。——译者注

4 “在空间中重合”（coincidence in space）这一短语的意义不需要在这里进一步探究。这一概念已经足够清楚，因而对它在实际上的适用性，也不太可能产生意见上的分歧。

5 在开始论述广义相对论（将在本书第二部分讨论）之前，不需要对这些观点加以改进和修正。

3. 时间

力学的目的在于描述物体在空间中的位置如何随“时间”改变。假如我没有经过认真思考和详尽解释，就用这种方式来表述力学的目的，我将因违背力求清晰明确的神圣精神而犯下重大过失。接下来，就由我们来揭示这些过失。

在这里，我们并不清楚应如何理解“位置”和“空间”。例如，我站在一列匀速前进的火车车厢里，并从车厢窗口丢下而不是抛掷一块石头到铁路路基。那么，假如不计空气阻力的影响，我会看到石头沿着一条直线下落。从人行道上观察这一举动的人，则会看到石头沿着一条抛物线落下。现在我想问：石头所经过的各个“位置”是“确实”在一条直线上，还是在一条抛物线上呢？还有，这里指的“在空间中”的运动又是什么意思呢？根据前一节的论述，答案不言自明。首先，我们要完全避开“空间”这一模糊的词汇；我们必须承认，我们对“空间”一词毫无概念，因而代之以“相对于作为参考的实质刚体的运动”。相对于参照系（火车车厢或铁路路基）的运动已在上一节中详细定义过。假如我们引入在数学描述中常用的观念“坐标系”来取代“参照系”，我们就可以说：石头相对于牢固地附着在车厢上的坐标系走过的是一条直线，但相对于牢固地附着在地面（路基）上的坐标系则经过一条抛物线。通过这个例子，我们可以清楚知道：没有独立存在的轨迹（trajectory，字面意义为“轨道曲线”[6]），只有相对于特定参照系的轨迹。

为了对运动进行完整的描述，我们必须说明物体是如何随时间改变其位置的；也就是说，对于轨迹上的每一个点，必须说明物体在什么时

刻位于该点。这些数据必须由一个关于时间的定义来补充，按照这个定义，这些时间可视为本质上可观测的量值（测量的结果）。假如我们基于经典力学，就能通过以下实验来满足这一要求。我们设想有两个构造完全相同的钟，站在火车车厢窗口的人拿着一个，在人行道上的人则拿着另一个。两个观察者各自按照自己手中所持时钟的每一声嘀嗒记录下的时间，来确定石头相对于自己的参照系所占据的位置。在这个实验中，我们并没有计入光传播速度的有限性所造成的不准确性。对于这一点以及实验中的另一项主要困难，我们将在后文详细论述。

6　path-curve，即物体的运动曲线。

4. 伽利略坐标系

众所周知，伽利略 - 牛顿力学的基本定律，即惯性定律（law of inertia），可以表述为：一个物体距离其他物体足够远时，都会继续保持静止或匀速直线运动状态。这个定律不仅涉及物体的运动，也指出了可以应用于力学描述的参照系或坐标系。惯性定律能够广泛适用于人眼可见的恒星运动。假如现在我们使用一个牢靠地附着在地球上的坐标系，那么相对于这一坐标系，每颗恒星在一个天文日（astronomical day）内运行的轨道都会是一个半径极大的圆，这一结果违反了惯性定律的描述。因此，假如我们要遵循这一定律，就只能参照恒星在其中不进行圆周运动的坐标系来观察这类运动。如果惯性定律适用于一个坐标系内的运动状态，那么这个坐标系就被称为“伽利略坐标系”（Galilean system of co-ordinates）7。伽利略 - 牛顿力学的定律只有在伽利略坐标系中才是成立的。

Der Regierungsrat des Kantons Zürich,
auf Einsicht eines Antrages der Erziehungsdirektion und des Erziehungsrates,
beschließt:

I. Als außerordentlicher Professor für theoretische Physik an der II. Sektion der philosophischen Fakultät der Hochschule Zürich wird ernannt:

Herr Dr. Albert Einstein, von Zürich, zurzeit technischer Experte am eidgen. Amt für geistiges Eigentum und Privatdozent an der Universität Bern.

II. Der Amtsantritt des Gewählten erfolgt auf 15. Oktober 1909.

III. Die Wahl geschieht auf eine Amtsdauer von sechs Jahren.

IV. Die Lehrverpflichtung umfaßt, bei 6–8 Stunden wöchentlich, Vorlesungen in den Lehrgebieten der theoretischen Physik eventuell mit praktischen Übungen.

V. Die Jahresbesoldung beträgt außer den ordnungsgemäß den Dozenten zufallenden Kollegiengeldern Fr. 4500.–.

VI. Der Gewählte ist verpflichtet, sich zum Eintritt in die Witwen- und Waisenkasse der Hochschullehrer anzumelden.

VII. Mitteilung an Herrn Dr. Albert Einstein in Bern.

Zürich, den 7. Mai 1909.

Vor dem Regierungsrate
Der Staatsschreiber:
D. A. Huber



888. K.

1909年5月7日，爱因斯坦被聘任为苏黎世大学理论物理学副教授，聘期六年。

7　Galilean原书均采用Galileian，应是早期拼法；为方便读者查找资料，中译本改成如今常用的拼法。——译者注

5.（狭义）相对性原理

为了更清晰地叙述本节内容，让我们回到设想为匀速行进的火车车厢这个例子。我们称车厢的运动为匀速平移（uniform translation，“匀速”是由于速度和方向恒定，“平移”则是由于虽然车厢相对于路基不断改变其位置，但它运动时没有发生转动）。让我们想象一只大鸟正飞过空中，从路基上观察，它的运动方式是匀速直线运动。假如我们从行进中的火车车厢中观察这只大鸟，就会发现大鸟在以另一种速度和方向飞行，但仍然是匀速直线运动。用抽象的方式来表述，我们可以说：如果一个质量为m的物体相对于一个坐标系进行匀速直线运动，只要第二个坐标系K'相对于K在进行匀速平移运动，则质量为m的物体相对于K'也在进行匀速直线运动。根据上一节的论述可以得出：如果K是一个伽利略坐标系，那么其他每一个相对于K作匀速平移运动的坐标系K'也是伽利略坐标系。相对于K'和K，伽利略-牛顿力学定律都是成立的。如果我们将上面的原则表述如下，则在推广方面又前进了一步：假如K'是相对于K作匀速运动且没有转动的坐标系，那么自然现象相对于K'的演变将与相对于K的演变相同，也依循完全相同的普遍定律。这一陈述被称为（狭义）相对性原理。



1895年，爱因斯坦来到苏黎世以西的阿劳州立中学。这里盛行瑞士教育改革家裴斯泰洛齐（Pestalozzi）的自由教育理念，良好的校风和负责任的教师点燃了爱因斯坦好奇心的火花。



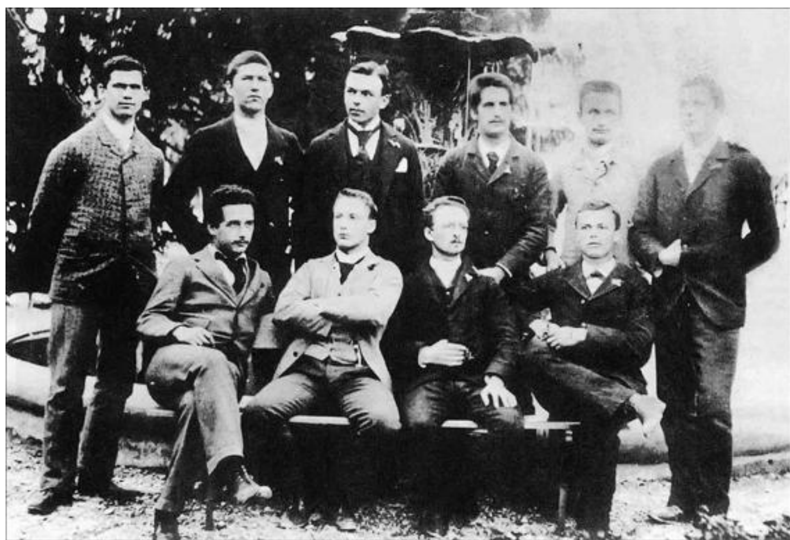
1884年的爱因斯坦（5岁）和妹妹玛雅（3岁）。

只要人们确信一切自然现象都能够借助经典力学来表述，就没有必要怀疑这个相对性原理的正确性了。但由于电动力学与光学的发展，人们越来越清楚地看到：经典力学为一切自然现象的物理描述提供的基础还不够充分。至此，讨论相对性原理的正确性这个问题的时机成熟了，而且当时看来，从这一问题得出否定的答案也并不是不可能的。

然而，有两个普遍的论据一开始就为相对性原理的真实性提供了非常有力的支持。即使经典力学并没有提供给我们一个足够宽广的基础来理解表述一切物理现象，我们仍然需要承认经典力学在很大程度上是“真理”，因为它对天体实际运动的描述达到了令人震惊的精确度。因此，在力学的领域中应用相对性原理必然达到很高的准确度。一个具有如此广泛的普遍性且在物理现象的一个领域中如此准确的原理，竟然在另一个领域中失效了，这从先验的（a priori）观点来看是不可能的。

现在来讨论第二个论据，我们以后还会进一步讨论它。假如（狭义）相对性原理不成立，那么进行相对匀速运动的K、K'、K''等一系列伽利略坐标系在自然现象的描述中就不是等效的。在此情况下，我们不得不相信自然定律能以一种特别简单的方式表述出来，这当然只有在下列条件下才能做到，即我们已经从一切可能存在的伽利略坐标系中，选定了一个具有特别运动状态的坐标系K_0作为参照系。于是，我们就有理由

（因为这个坐标系在自然现象的描述中有其优点）称这个坐标系为“绝对静止的”，而所有其他的伽利略坐标系K都是“运动的”。举例来说，假设我们的铁路路基是坐标系K_0，那么我们的火车车厢就是坐标系K，相对于坐标系K成立的定律将没有相对于K_0那样简单。这种定律简单性的消减来自车厢K相对于K_0而言是运动的（即“真正是”运动的）这个事实。在参照K所表述的普遍自然定律中，车厢速度的大小和方向必然是起作用的。例如，一根风琴管的轴与运动方向平行时所发出的音调，会和它的轴与运动方向垂直时所发出的音调不同。由于我们的地球是在环绕太阳的轨道上运行的，因而可以将它比作以大约每秒30千米的速度行进的火车车厢。假如相对性原理是不正确的，我们就应该预料到，地球在任何一个时刻的运动方向都将会出现在自然定律中，而且物理系统的行为将与其相对于地球的空间取向有关。由于地球公转速度的方向在一年中不断变化，地球不可能在全年中相对于假设的坐标系K_0都处于静止状态。不过，即使是最仔细的观测也从来没有发现地球物理空间的这种各向异性（anisotropic property），即不同方向在物理上的非等效性（physical non-equivalence）。这是支持相对性原理十分有力的论据。



1896年，爱因斯坦（前排左一）与阿劳州立中学同学的合影。

6. 经典力学中所用的速度相加定理

假设仍然是上文中提到的正以恒定速度v沿铁轨行进的火车车厢，且有一人在车厢中沿着车厢行进的方向以速度w从车厢一端走到另一端。那么在此过程中，相对于路基而言，这个人前进得多快呢？换句话说，他相对于路基的前进速度W是多少呢？我们似乎可以结合这些因素来思考唯一可能的答案：假如这个人在1秒内站着不动，他将相对于路基前进一段距离v，这在数值上与车厢的速度相等。然而，由于他向前走动，那么在这1秒内，他相对于车厢向前走了一段距离w，也就是相对于路基又多行进了一段距离w，这段距离在数值上等于此人在车厢中走动的速度。因而，在我们假设的这1秒内，此人相对于路基总共前进了距离W＝v＋w。不过我们之后将会发现，这个表述经典力学中速度相加定理的结果是难以维持的；换句话说，我们刚才写下的定律实质上是不成立的。但在目前，我们暂时假定它是正确的。

7. 光传播定律与相对性原理表面上的抵触

在物理学中几乎没有比光在真空中的传播定律更简单的定律了。每个上过学的孩子都知道，或者我们相信他知道，光是沿直线以c＝300 000km/s的速度传播的。无论如何，我们已经非常精确地知道：所有色光的速度都是相同的，否则当一颗恒星被邻近的暗天体掩食时，不同色光的最小发射值（minimum of emission）就不会被同时观测到。荷兰天文学家德西特（De Sitter）根据对双星的观测，也以相似的理由指出：光的传播速度与发光体的运动速度无关。关于光的传播速度与其在“空间中”的方向有关这个设定，事实上是难以成立的。

简而言之，我们可以假设“光（在真空中）的速度是恒定的”这一简单定律已有充分的理由被孩子们接受。但谁会想得到这个简单的定律竟会使缜密深思的物理学家陷入智力上极大的困难呢？让我们来看看这些困难是如何产生的。

当然，我们必须依据一个刚性参照系（坐标系）来描述光的传播过

程（其他的每一种过程都是如此）。让我们再次选择路基作为这样的参照系，并假设路基上方的空气已被抽空。假如有一道沿着路基传播的光线，我们从上方可以看到，这道光线的前端相对于路基正以速度c传播。现在我们假设车厢仍以速度v在铁轨上行驶，其方向与光线的方向相同，不过车厢的速度比光的速度要小得多。我们来探究一下这道光线相对于车厢的传播速度。在这里，我们可以应用前一节的论述，因为光线就好比相对于车厢走动的人，人相对于路基的速度W在这里被光相对于路基的速度取代，w是所求的光相对于车厢的速度，因而我们得到：

$$w = c - v$$

于是，光线相对于车厢的传播速率出现了小于c的情况。

但是这个结果与第5节阐述的相对性原理相抵触。因为根据相对性原理，光在真空中的传播定律与所有其他的普遍性自然定律一样，不论是以车厢作为参照系还是以铁轨作为参照系，都必须是一样的。但是，从我们前面的论述来看，这一点似乎是不可能成立的。假如每一道光线相对于路基都以速度c传播，那么基于此，似乎光相对于车厢的传播就必然遵循另一定律——这是一个与相对性原理相抵触的结果。

考虑到这种两难情况，除了放弃相对性原理或光在真空中传播的简单定律外，似乎没有其他办法。仔细阅读以上论述的读者几乎都认为我们应该保留相对性原理，因为它是自然而简单的，对知识分子很有说服力。因此，光在真空中的传播定律必须用一个较为复杂且合乎相对性原理的定律来取代。然而，理论物理学的发展显示我们不能遵循这个途径。洛伦兹[8]对与运动物体相关的电动力学和光学现象所进行的具有划时代意义的理论研究表明，在这一领域中的经验会无可辩驳地产生一个关于电磁现象的理论，而真空中光速的恒定性这一定律是它的必然推论。因而，尽管不曾发现与相对性原理相抵触的实验数据，杰出的理论物理学家们还是更倾向于舍弃相对性原理。



1896年10月，17岁的爱因斯坦进入苏黎世联邦理工学院（图为学院的物理楼）。这里并没有开设爱因斯坦感兴趣的理论物理学课程，所以他常常逃课，以自学为主。

相对论正是在这样的背景下登上了舞台。由于分析了时间和空间的物理概念，事情变得明朗：相对性原理和光传播定律两者并没有不相容的地方，而且假如同时系统贯彻这两条定律，就能得到一个逻辑严谨的理论。这个理论被称为狭义相对论（special theory of relativity），以区别于推广了的理论，至于广义理论，我们留待以后再讨论。下面我们将陈述狭义相对论的基本概念。

8 亨德里克·安东·洛伦兹（Hendrik Antoon Lorentz）：1853—1928年，荷兰物理学家，1902年与塞曼（P. Zeeman）共同获得诺贝尔物理学奖。——译者注

8. 物理学中的时间观

在铁路路基上有两个彼此距离很远的点A和点B，而闪电击中了这两点上的铁轨。我再补充一句，这两点的闪电光芒是同时出现的。假如我

问你这句话有没有意义，你会肯定地回答说：“有。”但是，如果我接着请你更确切地向我解释这句话的意义，你可能稍作思考后就会感到，回答这个问题并不像看起来那么容易。

过一会儿，或许你会这样回答：“这句话的意义本来就很清楚，无须进一步解释；当然，假如要我用观测来确定在实际情况中，这两起事件是否会同时发生，还需要考虑考虑。”但我并不满意这个答案，理由如下，假如一位能干的气象学家经过巧妙的思考后，发现闪电必然总是同时击中A和B，那么我们就需要检验这一理论结果是否与实际相符。凡是其中含有“同时”（simultaneous）概念的物理陈述，都将遇到同样的困难。对物理学家而言，在他有可能判断一个概念在实际情况中是否真的被满足之前，这个概念就还不能成立。因此我们需要一个具有同时性（simultaneity）的定义，这个定义必须能提供一个方法，以便例子中的物理学家可以利用它通过实验来确定那两点的雷击是否同时发生。在这个要求尚未得到满足之前，我就认为我能够对同时性这个论述赋予某种意义，那么作为一名物理学家，这就未免有些自欺欺人了（当然，假如我不是物理学家也是一样的）。（请读者在确信这点之前，先不要继续读下去。）

在经过一段时间的思考后，你提出下列建议来检验同时性这个概念。沿着铁轨就能测量出AB两点连线的长度，然后让一位观察者站在AB连线的中点M上。这位观察者需要一种装置（例如，两面相互成90°的镜子），使他能同时观察到A和B。假如这位观察者在同一时间观察到闪电光芒，那么它们就是同时出现的。

我对这个建议感到十分高兴，但却不认为问题已经完全解决了，我不得不提出下列反对理由：“假如我知道位于M点的观察者看到的闪电，沿AM长度传播的速度与沿BM传播的速度相同，那么你的定义当然是对的。但是，想要验证这个假设，只有我们掌握了测量时间的方法才有可能。如此看来，我们好像是在逻辑圈子里打转。”

经过进一步的思考，你带着轻蔑的眼神瞟了我一眼——这是无可厚非的，并宣称：“尽管如此，我仍然坚持我先前的定义，因为实际上这个定义并没有对光进行任何假设。对于同时性的定义只有一个要求，那就

是在每一种实际情况中，这个定义必须为我们提供一个实验方法，以判断所规定的概念是否真的被满足了。我的定义已经满足了这个要求，这是无可辩驳的。光沿AM路径传播与沿BM路径传播所需时间相同，这实际上并不是关于光的物理性质的假设（supposition）或假说（hypothesis），而是为了得出同时性的定义，我按照自己的自由意志所做出的一种规定（stipulation）。”

这个定义显然不仅能给两起事件的同时性一个确切的意义，还能对我们愿意选定的任意多起事件的同时性也给出一个确切的意义，并且与这些事件发生的地点相对于参照系（在我们的例子里就是铁路路基）的位置无关。9由此，我们也可以得出物理学中“时间”的定义。为此，我们假设把构造完全相同的钟放置在铁路线（坐标系）上的A、B、C点上，并通过以下方法校准它们：使它们的指针同时（按上述意义来理解）指着相同的位置。在这些条件下，我们将一起事件的“时间”理解为在该事件（空间）最近一点的钟上的读数（指针所指的位置）。这样，每一个本质上可以观测的事件都有一个时间数值与其相联系。



在苏黎世联邦理工学院读书时的爱因斯坦。

上述规定包含了进一步的物理假说，假如没有相反的实验证据，那么这个假说的有效性是不会被怀疑的。我们已经进行过假设，如果所有钟的构造完全一致，它们就会以相同的比率（at the same rate）运转。

更确切地说，假如我们校准静止在一个参照系上不同地方的两个钟，使其中一个钟的指针指着某一特定位置的同时（按上述意义来理解），另一个钟的指针也指着相同的位置，那么完全一样的“指针位置”（setting）就是同时的（同时的意义按上述定义来理解）。

9　我们进一步假设，假如有三个在不同地点按下列方式发生的事件A、B和C，即A与B同时，而B又与C同时（同时的意义按上述定义理解），那么A和C的同时性判据也就得到了满足。这种假设是关于光传播定律的一个物理假设，假如我们支持真空中光速恒定这一定律，那么这种假设也就必然会被满足。

9. 同时性的相对性

到目前为止，我们的论述一直参照被我们称之为“铁路路基”的特定参照系来进行。假设有一列很长的火车，以匀速v沿着图1所标明的方向在铁轨上行驶，这列火车上的乘客可以方便地将火车当作刚性参照系（坐标系）；他们参照火车来观察一切事件。因而铁路沿线发生的每一起事件也在相对于火车的某一特定点发生。而且和相对于路基来定义同时性一样，我们也可以相对于火车来定义同时性。但是，作为一个自然的推论，下列问题也随之而来：

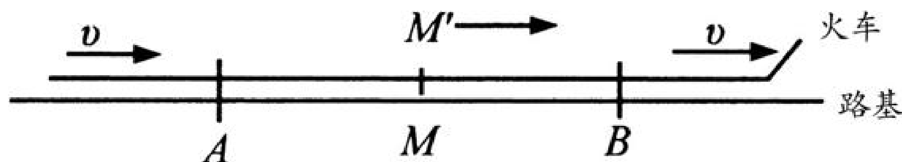
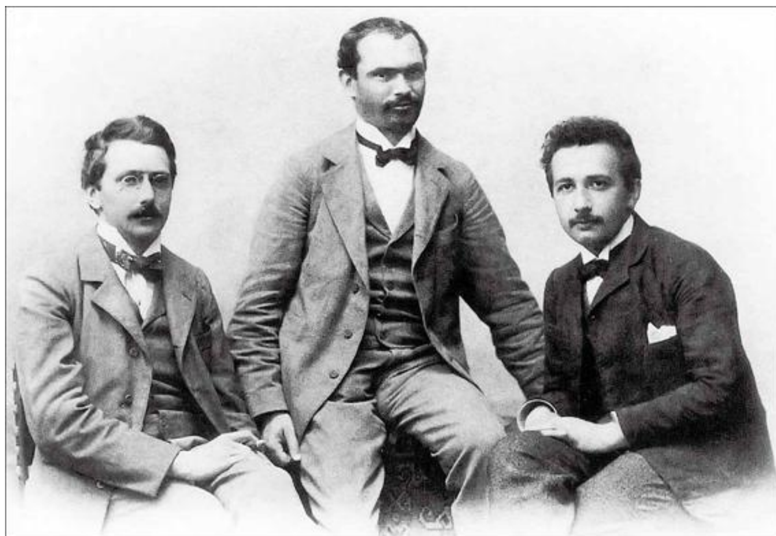


图 1

对于铁路路基来说是同时的两起事件（例如A、B两点的雷击），对于火车来说是否也是同时的呢？我们将直接证明答案必然是否定的。



爱因斯坦与好友创建“奥林匹亚科学院”，图中左起：康拉德·哈比希特（Conrad Habicht）、莫里斯·索洛文（Maurice Solovine）和爱因斯坦。

当我们说A、B两点的雷击相对于路基而言是同时的，意思是：从出现闪电的A点和B点发出的光线，会在路基AB这段长度的中点M相遇。但事件A和B也与火车上A与B的位置相对应。令M'为行驶中的火车上的AB这段距离的中点。正当闪电光芒出现的时候10，点M'自然与点M重合，但是点M'以火车的速度v向图中的右方移动。假如坐在火车上M'点的一位观察者并不具有这个速度，那么他会永远停留在M点，闪电从A和B所发出的光线将同时到达他这里，即光线将正好在他所在的地方相遇。可是实际上（相对于铁路路基来说），这位观察者正朝着来自B的光线急速行进，同时他又在向来自A的光线的前方行进。因此这位观察者将先看到从B发出的光线，后看到从A发出的光线。所以，把火车当作其参照系的观察者就必然得出这样的结论，即闪光B比闪光A早出现。于是我们得出下列重要结果：

对于路基而言是同时的若干事件，对于火车而言并不是同时的，反之亦然（即“同时性的相对性”，relativity of simultaneity）。每一个参照系（坐标系）都有它自身的特殊时间，除非告诉我们关于时间的陈述是相对于哪一个参照系，否则关于一起事件的时间的陈述就没有意义。

在相对论问世之前，物理学中一直有一个隐含的假设，即时间的陈述具有绝对的意义，也就是说，它与参照系的运动状态无关。但是我们刚才已经看到，这种假设与最自然的同时性的定义是不相容的；如果我们舍弃这一假设，那么光在真空中的传播定律与相对性原理之间的抵触也就消失了。

这个抵触是根据第6节的论述推测出来的，这些论点现在已经站不住脚了。在该节我们曾推出下列结论：假如车厢内的人相对于车厢每秒走过的距离为w，那么在每秒的时间里，他相对于路基也会走过相同的一段距离。但是，根据以上论述，相对于车厢发生特定事件所需的时间，绝不等于相对于（作为参照系的）路基发生同一事件所需的时间。因此我们不能说：在车厢内走动的人相对于铁路线走过W的距离所需的时间从路基上判定也是1秒。

1902年2月4日，爱因斯坦写给未婚妻米列娃·玛丽克（Mileva Marić）的信。两人是苏黎世联邦理工学院的同班同学。

此外，第6节的论述还基于另一个假设，而且就严格的探究来说，这一假设是任意的，尽管在相对论创立之前，人们一直在物理学中隐藏着这个假设。

10　从路基上判断。

10. 距离概念的相对性

假设一列火车以匀速v沿路基行驶，我们考虑火车上的两个特定点11，并研究两点间的距离。我们已经知道，测量一段距离需要一个参照系，以便相对于这个物体量出这段距离，最简单的办法是将火车本身作为参照系（坐标系）。火车上的一位观察者测量这段间隔的办法，是用他的量杆沿着一条直线（例如，沿着车厢的地板）从一个定点量到另一个定点，那么，量杆需要量多少下得到的数字才是所求的距离呢？

假如要从铁路线上来判定（火车上的）这段距离，那就是另一回事了。假如把火车上需要求出距离的两个点称为A'和B'，则这两点都以速度v沿着路基移动。首先，我们需要在路基上确定两个对应点A和B，使A'和B'恰好在特定时刻t分别通过A和B——由路基来判定。路基上的A点和B点可以引用第8节给出的时间定义来决定。然后再用量杆沿着路基逐次量取A、B两点之间的距离。

从之前的观点来看，我们的确无法肯定这次测量的结果会与第一次（在火车车厢中）测量的结果相同，所以在路基上量出的火车长度可能与在火车上量出的火车长度不同。这种情况使我们有必要对第6节中表面上看起来很显然的论述提出第二个反对意见，也就是说，假如车厢内的人在单位时间内走过一段距离w（从火车上量得的），则这段距离如果在路基上来测量并不一定也等于w。

11　例如第一节车厢的中点和第二十节车厢的中点。

11. 洛伦兹变换

前三节的结果表明，光传播定律与相对性原理表面上的不相容，是通过这样的思考推导出来的，这种思考从经典力学中借用了两个不正确的假设，这两个假设如下：

（1）两起事件的时间间隔（时间）与参照系的运动状态无关。

（2）一个刚体上两点的空间间隔（距离）与参照系的运动状态无关。

看来光在真空中的传播定律与相对性原理是可以相容的，因此产生了下列问题：我们需要如何修改第6节中的论述，才能消除这两个基本经验结果之间表面上的矛盾呢？这个问题导致一个普遍性问题。在第6节的讨论中，我们既要相对于火车，又要相对于路基来谈地点和时间。当我们已知一起事件相对于铁路路基的地点和时间，如何求出该事件相对于火车的地点和时间呢？对于这个问题是否有一个能使光在真空中的传播定律与相对性原理不相抵触的答案呢？换言之，我们能否设想在个别事件相对于两个不同参照系的地点和时间之间存在一种关系，使得每一条光线不论是相对于路基还是火车都具有传播速度c呢？这个问题引出了一个十分明确的正面答案，以及当一起事件从一个参照系变换到另一个参照系时，空－时量值（space-time magnitudes）完全明确的变换定律。



1903年1月6日，爱因斯坦与米列娃·玛丽克结婚。

在讨论这点之前，我们先介绍一下附带条件。到目前为止，我们只考虑沿着路基发生的事件，这在数学上必须假设为一条直线的函数。如第2节所述的方式，我们可以设想在这一参照系的横向和垂直方向各补上一个用杆构成的框架，以便参照这个框架来确定发生事件的空间位

置。同样，我们可以设想以速度v行驶的火车绵延整个空间，这样无论一起事件有多远，我们都能参照另一个框架来确定其空间位置。我们尽量不考虑这两套框架实际上会不会因固体的不可入性（impenetrability）而不断相互干扰的问题，这样做不至于出现根本性的错误。我们可以设想，在每一个这样的框架中画出三个互相垂直的面，并称之为“坐标平面”（co-ordinate plane，这些平面共同构成一个坐标系）。于是，坐标系K对应路基，坐标系K'对应火车。一起事件无论发生在哪里，它在空间中相对于K的位置都可以由坐标平面中的三条垂线x、y、z来确定，时间则由时间量值（time-value）t来确定。相对于K'，同一事件的空间位置和时间将由相应的量值x'、y'、z'、t'来确定，这些量值与x、y、z、t当然并不全等。关于如何将这些量值视为物理测量结果，前文已进行了详尽叙述。

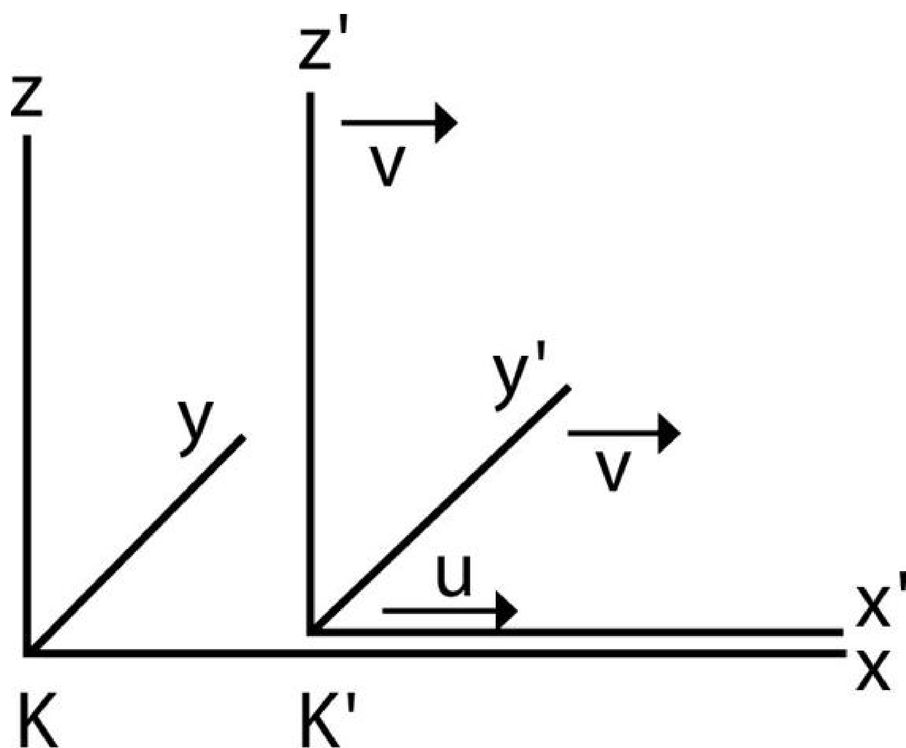


图 2

显然，我们的问题可以精确地表述如下，如果一起事件相对于K的

x、y、z、t各个量值已经给定，则同一起事件相对于K'的x'、y'、z'、t'各个量值是多少呢？在选定关系式时，必须使相对于K和K'的同一条光线（当然对于每一条光线都必须如此）满足光在真空中的传播定律。如果这两个坐标系在空间中的相对取向如图2所示，这个问题就可以用下列方程组解出：

$$x'=\frac{x-vt}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y'=y$$

$$z'=z$$

$$t'=\frac{t-\frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

这个方程组通常被称为“洛伦兹变换”（Lorentz transformation）。12假如我们不是依据光传播定律，而是依据旧力学的时间和长度具有绝对性这一隐含的假设，那么我们得到的就不是上述的方程组而是如下的方程组：

$x' = x - vt$

$y' = y$

$z' = z$

$t' = t$

这个方程组通常被称为“伽利略变换”（Galilean transformation）。在洛伦兹变换方程中，如果我们以无穷大值代换光速c，就可以得到伽利略变换方程式。



1904年5月14日，爱因斯坦的大儿子汉斯出生。

通过下列例子，我们可以很容易地看出，按照洛伦兹变换，无论对于参照系K还是对于参照系K'，光在真空中的传播定律都是可以被满足的。例如，沿着正x轴发出一个光信号，这个光刺激（light-stimulus）会按照下列方程式前进：

$x = ct$

即以速度c前进。按照洛伦兹变换方程，这个x与t之间的简单关系式包含着一个x'与t'之间的关系式。事实上也的确如此，将x的值ct代入洛伦兹变换的第一和第四个方程中，我们就得到：

$$x' = \frac{(c-v)t}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

$$t' = \frac{(1-\frac{v}{c})t}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

将两个方程相除直接得到下式：

$x' = ct'$

即参照坐标系K'，光的传播应按照这一方程式进行。由此我们看到，光相对于参照系K'的传播速度也等于c。对于沿任何其他方向传播的光线，我们也会得到同样的结果。当然这一点不足为奇，因为洛伦兹变换方程就是依据这一观点推导出来的。

12　洛伦兹变换的简单推导见附录一第1节。

12. 量杆与钟在运动时的行为

我沿着参照系K'的x'轴放置一根尺子，让其一端（开端）与点x' = 0重合，另一端（末端）与点x' = 1重合，问尺子相对于参照系K的长度是

多少？想求出这个数值，我们需要求出在参照系K的某一特定时刻t，以及尺子的开端和末端相对于K的位置。借助洛伦兹变换的第一个方程，这两点在时刻t＝0的值可以表示为：

$$x（尺子末端）=0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

$$x（尺子末端）=1\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

两点间的距离为$\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$。但尺子相对于K以速度v运动。因此，沿着其本身长度的方向以速度v运动的刚性尺子的长度为$\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$米。因此尺子在运动时比在静止时短，而且运动得越快，尺子就越短。当速度v＝c时，我们就有$\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$＝0，而对于比c还大的速度，平方根会变成负值。由此我们得出结论：在相对论中，速度c扮演着极限速度的角色，任何真实的物体既不能达到，也无法超越这一速度。

当然，速度c作为极限速度的特性也可以从洛伦兹变换方程中清楚地看到，因为如果我们选取比c大的v值，这些方程就没有意义了。

反之，如果考察的是一根相对于K静止在x轴上的尺子，我们就应该发现，当从K'去判定时，尺子的长度是$\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$；这完全符合相对性原理，而相对性原理是我们进行考察的基础。

从之前的观点来看，显然我们一定能够从变换方程中对量杆和钟的物理行为有所了解，因为x、y、z、t这些量正是借助量杆和钟获得的测

量结果。如果我们基于伽利略变换来进行考察，就不会得出量杆因运动而收缩的结果。

现在我们考虑一个恒定于K'的原点（x'＝0）上的按秒报时的钟（seconds-clock）。t'＝0和t'＝1对应于钟接连发出的两声嘀嗒声。对于这两次嘀嗒声，洛伦兹变换的第一和第四个方程给出：



1905年，爱因斯坦与米列娃。这时，米列娃已经放弃了她的专业，专心于家庭。

t＝0

和

$$t=\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

从K来判定，钟会以速度v运动；从这个参照系来判定，钟的两次嘀

嗒声间经过的时间不是1秒，而是$\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$秒，即比1秒长一些。钟因运动而比静止时走得慢。速度c在这里仍然扮演着无法达到的极限速度的角色。

13. 速度相加定理——菲佐实验

事实上，与光速相比，钟和量杆运动所能达到的速度是非常小的；因而我们不太可能将前一节的结果与实际情况相比较。但是另一方面，这些结果必定会让读者感到非常奇特。因此，我将推导出另一结论，这个结论很容易从前面的论述中推得，而且它可以十分完美地通过实验证实。

在第6节中，我们推导出同向速度相加定理，所用形式也可由经典力学的假设推导出。这一定理也可以很容易地由伽利略变换（第11节）推导出。我们引进一个相对于坐标系K'运动的质点以取代车厢中走动的人，质点的运动方程如下：

$x' = wt'$

借助伽利略变换的第一和第四个方程，我们可以用x和t来表示x'和t'，因此我们得到：

$x = (v + w)t$

这个方程表示的正是质点相对于坐标系K（人相对于路基）的运动定律。我们用符号W表示这一速度，如第6节中那样，我们得到：

$W = v + w$ （A）

但是我们也可以依据相对论来进行探讨。在方程中，

$x' = wt'$

我们必须引用洛伦兹变换的第一和第四个方程将x'和t'用x和t表示出

来。这样我们得到的就不是方程（A），而是方程

$$W=\frac{v+w}{1+\frac{vw}{c^2}} \tag{B}$$

上式是基于相对论的同向速度相加定理。现在出现的问题是，这两个速度相加定理中哪一个更符合实验？关于这点，我们可以从杰出的物理学家菲佐13在半个多世纪前14进行的一个极为重要的实验得到启发，后来一些最优秀的实验物理学家也重新做过这个实验，因此这个实验的结果是毋庸置疑的。这个实验涉及下列问题：光以特定速度w在静止的液体中传播，现在假设液体以速度v在管内流动，那么光在管内沿箭头（参见图3）所指方向的传播速度是多少呢？

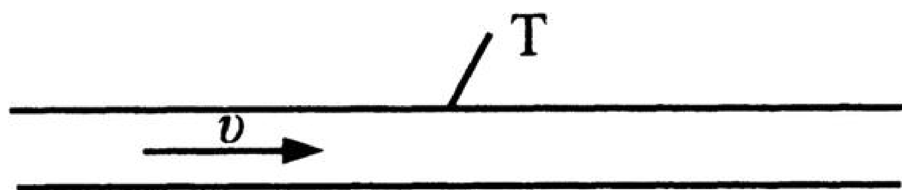


图 3

根据相对性原理，不论液体是否相对于其他物体运动，我们都必须认定光相对于液体总是以同一速度传播。因此，光相对于液体的速度和液体相对于管的速度就都已知了，我们想求出光相对于管的速度。显然，我们又遇到了第6节中论述的问题。管相当于铁路路基或坐标系，液体相当于车厢或坐标系K'，而光则相当于沿车厢走动的人或本节引入的运动质点。如果我们用W表示光相对于管的速度，那么W由方程式（A）或（B）给出，则视伽利略变换还是洛伦兹变换符合实际而定。实验 15得出的结果支持相对论导出的方程（B），而且非常符合。根据塞曼 16最近所做的极其卓越的测量，流体流速v对光的影响确实可以用方程（B）来表示，且误差在1%以内。



1907年，爱因斯坦夫妇与汉斯。

然而，我们必须注意到这样一个事实，早在相对论出现之前，洛伦兹就提出了一个关于这种现象的理论。他的理论属于电动力学范畴，并且是通过引用关于物质的电磁结构的特别假说而得出的。然而，这种情况丝毫没有削弱这一实验作为支持相对论的判决实验的准确性，因为原来的理论是基于麦克斯韦－洛伦兹（Maxwell-Lorentz）的电动力学，而后者与相对论并没有任何抵触。更恰当地说，相对论是由电动力学发展而来的，是先前相互独立的用以组成电动力学本身的各个假说的一种简明的综合与概括。

13　菲佐（Armand Hippolyte Louis Fizeau），1819—1896年，法国物理学家。——译者注

14　指1851年。——译者注

15　菲佐发现$W=w+v(1-\frac{1}{n^2})$，式中$n=\frac{c}{W}$是液体的折射率。另一方面，由于$\frac{vw}{n^2}$与1相比很小，我们可以先用$W=(w+v)(1-\frac{vw}{c^2})$代替（B）式，或按照同一阶的近似程度可以再用$W=w+v(1-\frac{1}{n^2})$代替

（B）式，这一方程与菲佐的实验结果相符。

16　彼得·塞曼（Pieter Zeeman）：1865—1943年，1902年与洛伦兹共同获得诺贝尔物理学奖。——译者注

14. 相对论的启发性价值

我们在前面各节的思路可以概述如下。经验导致了这样的论断，即一方面相对性原理是正确的，另一方面光在真空中的传播速度必须认为等于恒量（常数）c。将这两个公设结合起来，我们就得到关于构成自然界过程各个事件的直角坐标x、y、z和时间t的变换定律。关于这点，与经典力学不同的是，我们得到的不是伽利略变换，而是洛伦兹变换。

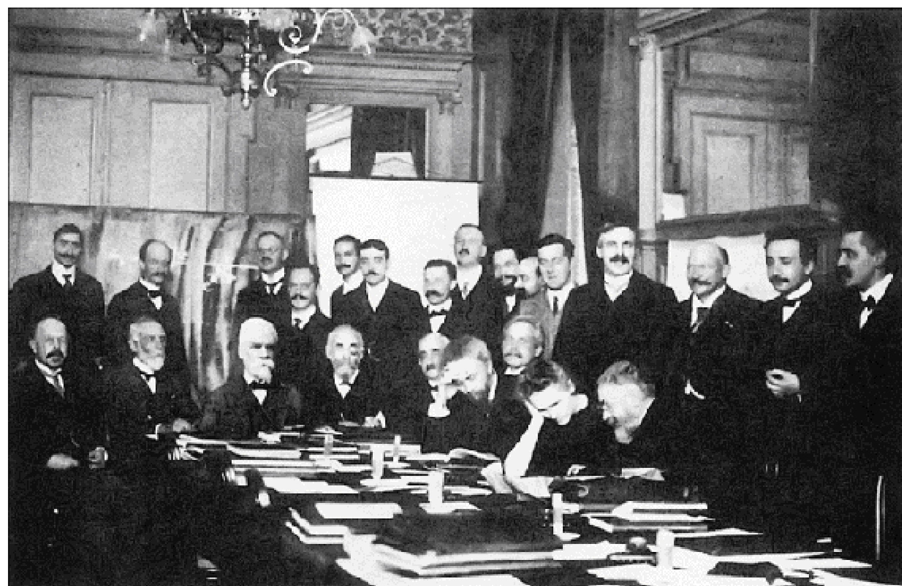
在这一思考过程中，我们的实际知识证实了光传播定律是正确的并起着重要的作用。一旦掌握了洛伦兹变换，我们就可以将它和相对性原理结合起来，从而总结出这个理论：

自然界的每一个普遍定律都必须如下建立：如果我们引用新坐标系K'的空–时变量（space-time　variables）x'、y'、z'、t'来代替原坐标系的空 - 时变量x、y、z、t，经变换后的定律形式则与原来的完全相同。这样，不带撇的量和带撇的量之间的关系由洛伦兹变换得出。简言之，自然界的普遍定律对于洛伦兹变换是协变的（co-variant）。

这是相对论对自然界定律的一个明确的数学条件，因此，相对论在帮助探索自然界的普遍定律中具有宝贵的启发作用。假如人们确实发现一个自然界的普遍定律不满足这个条件，则相对论的两个基本假设之中至少有一个是不正确的。现在就让我们来看看，到目前为止相对论已经确立了哪些普遍性结果。

15. 狭义相对论的普遍性结果

我们前面的论述清楚地表明，（狭义）相对论是从电动力学和光学发展而来的。在电动力学和光学的领域中，狭义相对论并没有对理论的预判进行多少修改，但它大大简化了理论的结构，即定律的推导过程；而且更重要的是，狭义相对论大大减少了构成理论基础的独立假设的数量。狭义相对论使麦克斯韦 - 洛伦兹理论看起来如此合理，以致即使没有实验能明显地予以支持，这个理论也能让物理学家们普遍接受。



1911年，第一届索尔维会议（Solvay Conference）在布鲁塞尔召开，此后每三年举办一届。会上，爱因斯坦的发言给玛丽·居里（Marie Curie）留下了深刻的印象，后来二人成了真挚的朋友。

经典力学必须加以修正才能符合狭义相对论的要求。但是，这种修正只会影响物质的速度v与光速相差不大的高速运动定律，只有在涉及电子和离子时才会遇到这种高速运动。对于其他运动来说，（狭义相对论得到的结果）与经典力学的差异就会小到难以呈现出来。在我们开始讨论广义相对论之前，先不考虑天体的运动。按照相对论，质量为m的质点，其动能不能再表示为众所周知的公式：

$$m\frac{v^{2}}{2}$$

而应表示为：

$$\frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

当速度v趋近于光速c时，上式趋近于无穷大。因此，无论用来产生加速度的能量有多大，速度必定都小于c。如果将动能的表示式以级数形式展开，我们得到

$$mc2 + m\frac{v^2}{2} + \frac{3}{8}m\frac{v^4}{c^2} + \ldots\ldots$$

如果$\frac{v^2}{c^2}$与1相比很小，那么上式第三项与第二项相比也会很小，因此在经典力学中仅考虑第二项。第一项mc2并未包含速度，如果我们只考虑质点的能量如何随速度变化这个问题，这一项也就无须考虑。我们将在后文叙述其本质上的意义。

狭义相对论所导致的具有普遍性的最重要结果是关于质量的概念。在相对论创立前，物理学已经确认了两个具有基本重要性的守恒定律，即能量守恒定律和质量守恒定律。过去，这两个基本定律看起来好像完全是相互独立的，但借助于相对论，这两个定律结合成了一个定律。我们将简短地思考一下这种结合是如何实现的，并且具有怎样的意义。

按照相对性原理的要求，能量守恒定律不仅对于坐标系K是成立的，而且对于每个相对于K做匀速平移运动的坐标系K'也应该是成立的，简而言之，对于每个伽利略坐标系都应该能够成立。与经典力学不同，从一个这样的坐标系过渡到另一个，洛伦兹变换是决定性因素。

通过简单的探讨，我们就可以根据这些前提，并结合麦克斯韦电动力学的基本方程式得出以下结论：如果一个物体正以速度v运动，并以辐射的形式吸收了大小为E_0的能量[17]，且在此过程中速度并没有发生改变，则物体因吸收而增加的能量为：

$$\frac{E_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

考虑上述关于物体动能的表达式，所求的物体的能量应为：

$$\frac{\left(m+\frac{E_0}{c^2}\right)c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

这个物体所具有的能量就与一个质量为（$m+\frac{E_0}{c^2}$），并以速度v运动的物体所具有的能量一样。因此我们可以说：如果一个物体吸收了大小为E_0的能量，那么其惯性质量（inertial mass）也应增加$\frac{E_0}{c^2}$的量值。可见物体的惯性质量并不是一个恒量，而是会随物体能量的变化而改变。甚至可以将一个物系（a system of bodies）的惯性质量视为其能量的一种量度。于是一个物系的质量守恒定律就等同于能量守恒定律，此质量守恒定律只有在该物系既不吸收也不放出能量的情况下才成立。如果将能量的表达式写成如下形式：

$$\frac{mc^2+E_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

我们看到，一直吸引我们注意的项只不过是物体在吸收能量以前原来具有的能量18。



1912年，爱因斯坦与数学家阿道夫·赫尔维兹（Adolf Hurwitz）及他的女儿莉丝贝思（Lisbeth）在苏黎世一起演奏小提琴。

目前（指1920年，见本节末尾英文版附注）要将这个关系式与实验直接比较是不可能的，因为还无法使一个物系发生的能量变化，大到足以使所引起的惯性质量变化达到可以观察的程度。与能量发生变化前已存在的质量m相比，$\frac{E_0}{c^2}$太小了。正是由于这种情况，经典力学才能将质量守恒确立为一个具有独立有效性的定律。

最后，让我来评述一个基本问题。电磁超距作用的法拉第 - 麦克斯韦诠释所获得的成功使物理学家们确信，并不存在像牛顿万有引力定律那样（不涉及中间介质）的瞬时超距作用。依据相对论，我们总是用以光速传播的超距作用来取代瞬时超距作用，即以无限大速度传播的超距作用。这点与速度c在相对论中起着基本重要作用的事实有关。在本书第二部分，我们将看到广义相对论是如何修正这个结果的。

英文版附注：随着α粒子、质子、氘核、中子或γ射线轰击元素引起的核变化过程（nuclear transfor-mation process）的实现，由关系式$E=mc^2$表示的质能等价性（equivalence of mass and energy）已得到充分证实。参与反应的各质量之和加上轰击粒子（或光子）的动能的等效质量，总是大于反应后所产生的各质量之和。两者之差就是所产生粒

子的动能的等效质量，或者是所释放出的电磁能（γ光子）的等效质量。同样，一个自发蜕变的放射性原子的质量，总是大于蜕变后所产生的各原子的质量之和，其差为所产生粒子的动能（或光子能）的等效质量。对核反应所释放出射线的能量进行测量，再结合这种反应的方程，就能够以很高的精确度计算出原子量。

17 E_0为所吸收的能量，是从与物体一起运动的坐标系判定的。

18 从与物体一起运动的坐标系进行判定。

16. 经验与狭义相对论

狭义相对论会在多大程度上得到经验的支持呢？这个问题是不容易回答的，理由已经在论述菲佐的重要实验时提及了。狭义相对论是电磁现象从麦克斯韦和洛伦兹关于电磁现象的理论衍化出来的。因此，所有支持电磁理论的经验事实也都支持相对论。我在这里要提及一个特别重要的事实，即相对论使我们能够预测地球相对于恒星的运动对从恒星传到地球的光所产生的效应。这些结果可以通过极其简单的方式获得，而所预示的效应已表明是与经验相符合的。我们指的是地球绕日运动所引起的恒星视位置周年运动（光行差，aberration of light），以及恒星对地球的相对运动的径向分量对于从这些恒星传到地球的光的颜色的影响。后者的效应表现为：从恒星传播到地球的光的谱线位置，与地球上的光源所产生的相同谱线的位置相比，存在微小移动（多普勒原理，Doppler principle）。支持麦克斯韦–洛伦兹理论同时也支持相对论的实验论据多到不胜枚举，事实上，这些论据对理论可能性的限制，已经达到只有麦克斯韦–洛伦兹的理论才经得起实验论证的程度。

但是有两类已知的实验事实，迄今只有在引入一个辅助假设后，才能用麦克斯韦–洛伦兹理论来说明，而这种假设本身——即不引用相对论——似乎不能与麦克斯韦–洛伦兹理论联系在一起。

大家知道，阴极射线和放射性物质发射出来的所谓β射线，是由惯

性很小但速度非常大的带负电的粒子（电子）组成的。通过研究这类射线在电场和磁场影响下的偏折情况，我们能够非常精确地研究这些粒子的运动定律。



1913年夏，居里夫人及她的两个女儿、爱因斯坦及他的大儿子一同去阿尔卑斯山徒步旅行。图中前排左起：家庭教师南莉小姐、爱娃·居里、汉斯·爱因斯坦，后排左起：爱因斯坦、居里夫人、伊琳娜·居里。

在对这些电子进行理论描述时，我们遇到了这样的困难：电动力学理论本身无法解释电子的本性。由于同种的电质量相互排斥，构成电子负的电质量（negative electrical mass）必然会在其本身相互排斥的影响下离散，除非有另外一种力作用在它们之间，但到目前为止我们还不清楚这种力的本性19。如果我们假设，构成电子的电质量彼此之间的相对距离在电子运动的过程中保持不变（即经典力学中所指的刚性连接），那么我们将得到一个不符合经验的电子运动定律。洛伦兹是根据纯粹形式的观点引进下列假说的第一人，电子的形状因其运动而在运动的方向上发生收缩，收缩的长度与$\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$成正比。这个未经任何电动力学事实证明的假设，却留给我们一个特别的运动定律，并在近年以相当高的精确度得到了证实。

相对论也会产生同样的运动定律，而且无须借助关于电子的结构和

行为等任何特殊假设。我们在第13节论述菲佐的实验时，也得出了相似的结论，相对论预言了这个实验的结果，而且无须引用关于液体的物理本性的假设。

我们所指的第二种事实涉及下列问题：地球在太空中的运动能否通过在地球上所做的实验来进行观察？我们在第5节中已经指出，所有这类想法都得到了否定的结果。在相对论提出之前，人们很难接受这个否定的结果，我们现在就来讨论其原因。人们对于时间和空间的传统偏见，不容许对伽利略变换在从一个参照系变换到另一个参照系中的首要地位产生任何怀疑。假设麦克斯韦－洛伦兹方程式对于参照系K是成立的，如果坐标系K和相对于K做匀速运动的坐标系K'之间存在着伽利略变换关系，那么我们会发现这些方程对于K'是不成立的。由此看来，在所有的伽利略坐标系中，对应某特定运动状态的坐标系（K）在物理上是唯一的。过去对这个结果的物理解释是，K相对于假设的空间中的以太（ether）是静止的。另一方面，所有相对于K运动着的坐标系K'都被认为是在相对于以太运动。人们曾假设，之所以对于K'成立的运动定律比较复杂，是因为K'在相对于以太运动（相对于K'的以太漂移，ether-drift）。严格地说，应该假设这样的以太漂移相对于地球也是存在的；因此长久以来，物理学家们付出了巨大的努力，试图探测地球表面是否存在着以太漂移。

在这些物理学家的设想中，最值得注意的是迈克尔逊[20]设计的一种方法，看起来极具决定性。设想在一个刚体上安放两面镜子，使其反射面彼此相对。如果整个系统相对于以太静止，那么光线从一面镜子反射到另一面镜子然后返回，就需要一段完全确定的时间T。但根据计算推得，假如这个刚体连同镜子正相对于以太运动，那么上述过程就需要一个略为不同的时间T'。还有一点：计算表明，如果相对于以太运动的速度都为v，那么物体垂直于镜子平面运动时的T'，与运动平行于镜子平面时的T'将不相同。虽然估算出来的这两个时间的差别极为微小，但在迈克尔逊和莫雷[21]所做的涉及光干涉的实验中，这个差别是能够被清楚地观察到的。但他们的实验给出了否定的结果，这一事实令物理学家深感困惑。洛伦兹和菲茨杰拉德[22]假设物体相对于以太的运动，会使物体在运动的方向上发生收缩，且收缩量恰好足以补偿前文提到的时间上的差

别，因而将理论从困境中解脱出来。与第12节的论述进行比较就可以看出，从相对论的观点来看，这种解决困难的方法也是对的。但如果以相对论为基础，那么解释的方法会更让人满意。按照相对论，并没有“特别优越的”（唯一的）坐标系这种东西可以用来作为引进以太观点的理由，因而不存在以太漂移，也不可能有任何实验可以演示以太漂移。此处运动物体的收缩是从相对论的两个基本原理推出的，并不需要引进任何特定的假设；至于造成这种收缩的首要因素，我们发现，并不是运动本身——我们无法给运动本身赋予任何意义，而是相对于这一范例中选定的参照系的运动。所以，对于一个与地球一起运动的坐标系而言，迈克尔逊和莫雷的镜子系统并没有收缩，但对一个相对于太阳保持静止的坐标系而言，镜子系统的确收缩了。

1913 Freitag.

Liebe Elsa!

Das kleine Rüffelchen, das Du mir wegen meiner Schweigsamkeit zukommen liessest, war nicht ganz unberechtigt, aber Du würdest begreifen, wenn Du sähest, wie wenig seelenruhige Minuten ich hatte, um Dir mit Behagen schreiben zu können. Vorlesungen, ewige Korrekturen, hartnäckiger Darmkatharrh u. damit zusammenhängende Verstimmung. Ich schreibe lieber gar nicht, als irgendwelche Galle in mein Geschreibsel tropfen zu lassen. Du musst dies nicht als Mangel an Zuneigung zu Dir deuten. Wenn wir in Berlin oft zusammen kommen, wirst Du sehen, dass wir ein paar gute Freunde fürs Leben sein werden, die einander das Dasein aufzuhellen vermögen. Das Schönste sollen unsere Spaziergänge im Grunewald sein und bei schlechtem

1913年11月7日，爱因斯坦写给表姐爱尔莎的信。

19　依据广义相对论，电子的电质量可能是由重力的作用而集结在一起的。

20　阿尔伯特·亚伯拉罕·迈克尔逊（Albert Abraham Michelson）：1852—1931年，美国物理学家，1907年获诺贝尔物理学奖。——译者注

21　爱德华·威廉姆斯·莫雷（Edward Williams Morley）：

1838—1923年，美国化学家、物理学家。——译者注

22　乔治·弗朗西斯·菲茨杰拉德（George Francis Fitzgerald）：1851—1901年，爱尔兰物理学家。——译者注

17. 闵可夫斯基四维空间

如果一个人不是数学家，那么当他听到“四维的”东西时可能会感到惊异，会产生一种不可思议的感觉。但是，我们所居住的世界就是一个四维时空连续体（four-dimensional space-time continuum），这其实是一种再平凡不过的说法。

空间是一个三维连续体。这句话的意思是，我们可以用三个数（坐标）x、y、z来表示一个（静止的）点的位置，并且在该点的邻近处有无限多个点，这些点的坐标都可以用诸如x1、y1、z1的坐标来表示，这些坐标的值与第一个点的坐标x、y、z相应的值要多近就可以有多近。由于这些数值非常接近，所以我们说这整个区域是一个“连续体”，并且由于有三个坐标数值，所以我们说它是三维的。

同理，闵可夫斯基23简称为“世界（world）”的物理现象的世界，从时空上来讲就是四维的。因为物理现象的世界由各个事件组成，而每一起事件都可以通过四个数值来表示，即三个空间坐标x、y、z和一个时间坐标——时间量值t。“世界”在这种意义中就是一个连续体；因为对每一起事件来说，我们愿意选取多少，其“邻近的”事件（已感觉到的或至少是可设想到的）就会有多少，这些事件的坐标x1、y1、z1、t1与最初的事件的坐标相差一个无穷小的量。过去，我们不习惯将世界按照这样的意义看成是一个四维连续体，因为在相对论未创立之前的物理学中，与空间坐标相比，时间扮演着一个不同且更为独立的角色。正是出于这个原因，我们才习惯于将时间看作一个独立的连续体。事实上，依据经典力学，时间是绝对的，也就是说时间与坐标系的位置和运动状态无关。这一点我们可以从伽利略变换的最后一个方程中看出来（t'＝t）。

在相对论中，以四维方式来思考这个“世界”是很自然的，因为依据相对论，时间已经失去了其独立性。洛伦兹变换的第四个方程可以表明：

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

而且，依照这个方程，甚至在两起事件相对于K的时间差Δt等于0的时候，通常这两起事件相对于K'的时间差$\Delta t'$也不等于0。两起事件相对于K的纯粹“空间距离”，成为这两起事件相对于K'的“时间距离”。但是闵可夫斯基这个对相对论具有重要作用的发现，在这里并没有欺骗我们,我们可以从他发现的事实中找到，相对论的四维时空连续体在其最重要的形式性质方面，与欧几里得几何空间（Euclidean geometrical space）的三维连续体有着明确的关系。24但是，为了表现出这一关系的重要地位，我们必须将通常的时间坐标用一个与其成正比的虚量（imaginary magnitude）$\sqrt{-1}\cdot ct$表示出来。在这些条件下，满足（狭义）相对论要求的自然定律可以用数学形式表示，其中时间坐标的作用与三个空间坐标的作用完全相同。在形式上，这四个坐标与欧几里得几何学中的三个空间坐标完全相等。甚至不是数学家也能清楚地看出，由于补充了形式上的知识，相对论的表示更为清晰了。



1914年，米列娃和两个孩子。当时，米列娃已经和爱因斯坦分居，汉斯10岁，爱德华4岁。

以上这些不充分的评述只能使读者对闵可夫斯基所贡献的重要观念有一个模糊的概念。如果没有闵可夫斯基的这些观念，广义相对论（其基本观念将在本书第二部分加以阐述）恐怕无法成长。闵可夫斯基的学说对于不熟悉数学的人来说可能会难以理解，不过要理解狭义或广义相对论的基本概念，并不需要深切了解闵可夫斯基的学说，所以我目前就谈到这里，在本书第二部分的末尾再回头讨论它。

23 赫尔曼·闵可夫斯基（Hermann Minkowski）：1864—1909年，德国数学家、物理学家。——译者注

24 更为详尽的论述参见附录一第2节。

第二部分：广义相对论

18. 狭义与广义相对性原理

19.重力场

20. 惯性质量和重力质量相等是广义相对性公设的一个论据

21. 经典力学和狭义相对论的基础在哪些方面无法令人满意？

……

18. 狭义与广义相对性原理

狭义相对性原理是我们此前全部论述中心的基本原理，也是所有匀速运动所具有的物理相对性的原理。让我们再来仔细分析它的意义。

从我们所接受的狭义相对性原理的观点来看，每一种运动都只能被认为是相对运动，这一点一直是很明确的。回到我们经常引用的铁路路基和车厢的例子，我们可以用以下两种方式来描述例子中出现的运动，它们同样是合理的：

（a）车厢在相对于路基运动。

（b）路基在相对于车厢运动。

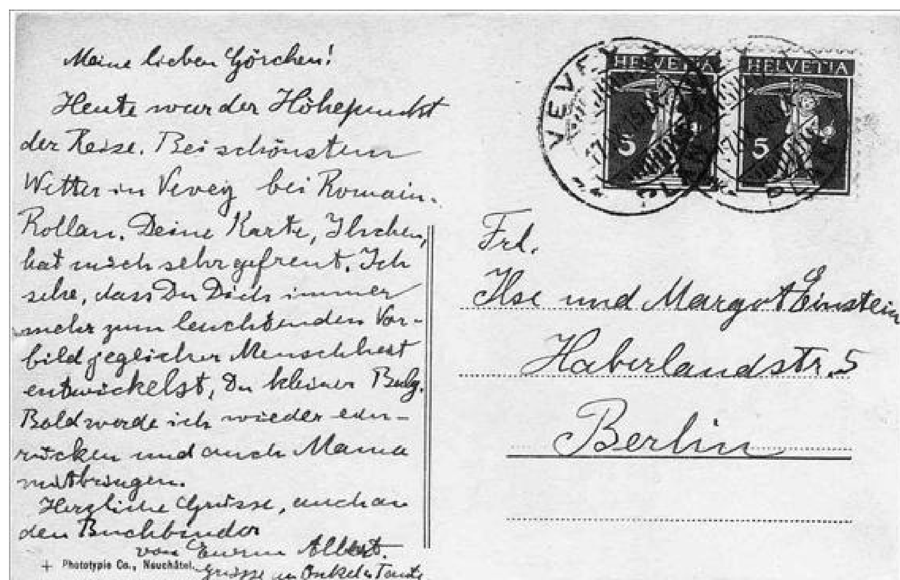
当我们表述所发生的运动时，在（a）中是将路基当作参照系，而在（b）中是将车厢当作参照系。假如只是探测或描述这个运动，那么我们选择相对于哪个参照系考察这一运动，在原则上都是无关紧要的。前文已提及这一点，但我们绝不能将其与被称为“相对性原理”的更加广泛的陈述相混淆，而是将相对性原理作为研究的基础。

我们在引用原理时，可以选取车厢或路基作为我们的参照系来描述任何事件（因为这也是不言而喻的）。我们的原理是这样规定的：如果我们在描述从经验得来的自然界的普遍定律时引用

（a）路基作为参照系；

（b）车厢作为参照系；

那么这些自然界的普遍定律（例如力学定律或光在真空中的传播定律）在这两种情况中的形式是完全一样的。这一点也可以这样表述：对于自然过程的物理描述而言，在参照系K和K'中没有哪一个是唯一的（unique，字面意义是“特别标出的”）。与第一个陈述不同，后一个陈述就先验的观点而言并不一定是成立的；这个陈述并不包含在“运动”和“参照系”的概念中，也无法从它们中得出，唯有经验才能判定这个陈述是否正确。



Meine lieben Görchen!

Heute war der Höhepunkt der Reise. Bei schönstem Wetter in Vevey bei Romain Rolland. Deine Karte, Ilsechen, hat mich sehr gefreut. Ich sehe, dass Du Dich immer mehr zum leuchtenden Vorbild jeglicher Menschheit entwickelst, du kleiner Bulg. Bald werde ich wieder einrücken und auch Mama mitbringen.

Herzliche Grüsse, auch an den Buchbinder

von Eurem Albert.

Grüsse an Onkel & Tante.

+ Phototypie Co., Neuchâtel.

HELVETIA 5 HELVETIA 5

VEVEY

Frl.

Ilse und Margot Einstein

Haberlandstr. 5

Berlin

1915年9月17日，爱因斯坦写给未来继女伊尔莎和玛格特的明信片。

但是，到目前为止，我们根本没有认定所有参照系K在表述自然定律方面具有等效性。我们的思路主要如下。

首先，我们假设存在一个参照系K，它的运动状态符合伽利略定律——一个不受外界作用并离其他质点足够远的质点，沿直线做匀速运动，这个参照系K（伽利略参照系）表述的自然定律应该是最简单的。但是除了K以外，所有参照参照系K'表述的自然定律也应该是最简单的，只要这些参照系相对于K处于匀速直线无转动运动（uniform rectilinear and non-rotary motion）状态，这些参照系在表述自然定律上就应完全等效于K，所有这些参照系都应被认为是伽利略参照系。迄今为止，我们假设相对性原理只有对这些参照系才是成立的，而对于其他参照系（例如具有另一种运动状态的参照系）则是不成立的。在这一意义上，我们称其为狭义相对性原理或狭义相对论。

与此对比，我们将“广义相对性原理”（general principle of relativity）理解为：所有参照系K、K'等，不论其运动状态如何，描述自然现象（表述自然界的普遍定律）都是等效的。但在继续讨论之前应该指出，这一陈述以后应该会由一个更为抽象的陈述来取代，其理由届时自可明白。

由于狭义相对性原理的合理性已被证实，因此每一个追求普遍结果的有识之士，都会朝着广义相对性原理的探索之路前进。但是从一种简单且表面上颇为可靠的考虑来看，似乎至少在目前来说这种努力成功的希望很小。让我们再回到我们的老相识——以匀速行驶的火车车厢。只要车厢做匀速运动，那么车厢里的人就不会感受到车厢的运动；由于这个理由，车厢中的人会毫不犹豫地解释说：这个例子表明车厢是静止的，而路基在运动。依据狭义相对性原理，这种解释从物理观点来看也是十分合理的。

假如车厢的运动变为非匀速运动，例如猛然刹车，那么车厢里的人会感受到一种相应的朝前的猛烈拉力。这种减速运动是车厢相对于车厢里的人表现出来的力学行为，这种力学行为与上述例子中的力学行为不同；因为这一理由，对于静止或做匀速运动的车厢成立的力学定律，并不能适用于做非匀速运动的车厢。总之，伽利略定律显然并不适用于做非匀速运动的车厢。因此，我们认为目前不得不暂时采取一种违反广义相对性原理的做法，对非匀速运动赋予一种绝对的物理实在性（absolute physical reality），但我们在下文就会看到，这一结论是无

法成立的。

19.重力场

“假如我捡起一块石头，然后放开手，为什么石头会落到地上呢？”通常这个问题的答案是：“因为石块受到了地球的吸引。”现代物理学的答案则不同，其理由如下。

对电磁现象的仔细研究使我们产生了这样的看法，如果没有某种中间介质在其间起作用，那么超距作用就不会发生。例如，磁铁吸引一块铁片，假如这意味着磁铁穿过两者间一无所有的空间直接作用于铁片，我们是不会满意这个解释的；我们不得不按照法拉第的方法，设想磁铁总是在其周围的空间中产生某种具有物理实在性的东西，这种东西就是我们所称的“磁场”。磁场作用在铁片上，使铁片朝磁铁运动。我们先不讨论这个概念是否合理，这个概念确实有些随意。我们只提一点，借助这个概念，电磁现象的理论表述会比不借助它更令人满意，而对于电磁波的传播更是如此。我们也可以用类似的方式来看待重力（引力，gravitation）的效应。



爱因斯坦表姐爱尔莎的两个女儿：伊尔莎和玛格特，后改姓爱因斯

坦。约1912年拍摄于柏林。

地球并不会对石块产生直接作用。地球在其周围产生重力场（gravitational field），重力场作用于石块，引起石块的下落运动。我们从经验得知，当我们离地球越来越远时，地球对物体的作用强度会按照明确的定律逐渐减小。从我们的观点来看，这意味着为了正确表述重力作用如何随着物体与受作用物体间距离的增加而减小，支配空间中重力场性质的定律必须是一个完全确定的定律。大体上可以这样理解：物体（例如地球）在其附近直接产生一个场，场在离物体更远处的各点上的强度和方向，就由支配此重力场本身的空间性质的定律所决定。

与电场和磁场对比，重力场呈现出一个极其显著的性质，这一性质对以下论述十分重要。单独受重力场的影响而运动着的物体，会得到一个加速度，这一加速度的大小与物体的材料和物理状态无关。例如，在重力场中有一块铅和一块木头，都是从静止状态或以相同的初速度开始下落，则它们下落的方式将完全相同（在真空中）。这个非常精确的定律可以表述为另一种形式。

按照牛顿运动定律，我们有

（力）=（惯性质量）×（加速度）

其中“惯性质量”（inertial mass）是被加速的物体的一个特征恒量。如果重力是加速度的起因，我们就有

（力）=（重力质量）×（重力场强度）

其中“重力质量”（gravitational mass）同样是物体的一个特征恒量。从以上两式可得：

$$（加速度）=\frac{（重力质量）}{（惯性质量）}\times（重力场强度）$$

假如正如我们从经验中发现的那样，加速度与物体的材料和状态无关，并且对给定的重力场和加速度总是一样的，那么重力质量与惯性质量的比值，对一切物体而言也必然是一样的。选取适当的单位，我们可

以使其比值等于1。于是，我们得出下列定律：一个物体的重力质量等于其惯性质量。

这个重要的定律过去已经被记载在力学中，然而并没有得到解释。我们必须承认下列事实才能得到满意的解释：物体的同一个性质视所处的环境不同，或表现为“惯性”，或表现为“重量”（weight，字面意义是“重性”，heaviness）。在下节中我们将说明这一情况真实到何种程度，以及这个问题如何与广义相对性公设（general postulate of relativity）相联系。

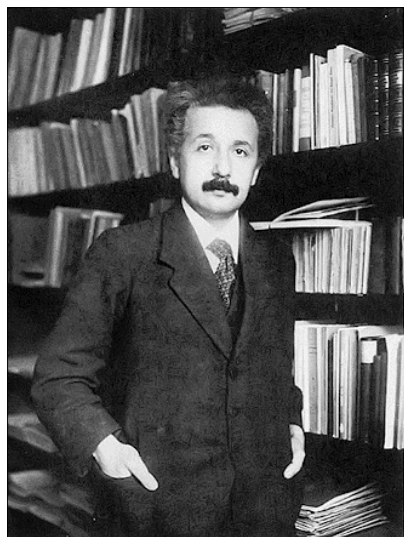
20. 惯性质量和重力质量相等是广义相对性公设的一个论据

我们想象一个很大的、一无所有的空间，这里离恒星及其他可以感知到的质量都非常遥远，可以认为我们已经近似地拥有了伽利略基本定律所要求的条件。于是，我们可以为这部分空间（世界）选取一个伽利略参照系，相对于此参照系，静止的点继续保持静止，而运动的点继续做匀速直线运动。我们将参照系设想为一个如同房间的宽大箱子，里面有一位配备了仪器的观察者。对这位观察者而言，重力自然不存在，他必须用绳子将自己拴在地板上，否则他只要轻触地板就会慢慢升向房间的天花板。

箱盖外面正中有一个系着绳索的钩子，现在想象一个“生物”（是什么生物对我们来说并不重要）开始用一个恒定的力拉绳索，于是箱子连同观察者开始以匀加速运动“朝上”移动。倘若从另一个未被绳索牵拉的参照系来观察这一切的话，经过一段时间后我们会发现，他们将达到一个前所未有的高速度。

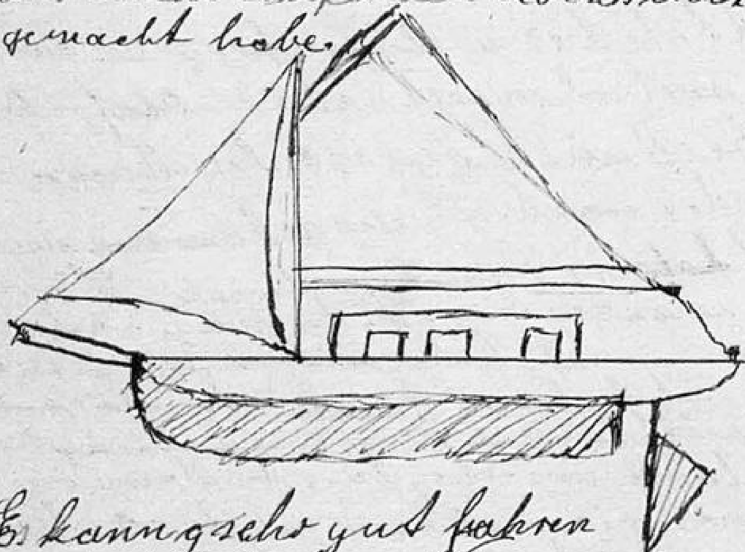
但是箱内的人是如何看待这一过程的呢？箱子的加速度将通过箱子地板的反作用传给他。因此，假如他不愿意整个人躺倒在地板上，他就必须用他的双腿来承受压力。于是，他站立在箱子内的情形如同任何一个人站立在地球上的一个房间内一样。假如他松手放开一个原来拿在手

中的物体，箱子的加速度就不会再传到这个物体上，因此这个物体将以相对的加速运动（accelerated relative motion）落到箱子的地板上。观察者将进一步断定：不论实验中的物体是什么，物体朝向箱子地板的加速度总是相同的。



1916年的爱因斯坦。

依靠他对重力场的知识（如同前文所讨论的），箱内的人将会得出下列结论：自己和箱子正处在一个对时间而言是恒定不变的重力场中。当然，他可能会一时感到迷惑不解，为什么箱子不会在这个重力场中降落。但是就在这个时候，他发现了箱盖中央的钩子及其相连的绳索，就会产生这样的结论：箱子是静止地悬挂在重力场中的。


In letzter Zeit habe ich immer an einem Schiff gearbeitet, das ich aus einem einfachen Holzschiffchen gemacht habe.

Es kann sehr gut fahren und ich habe viel Freude daran.

Viele Grüße

Dein Albert.

1916年11月，大儿子汉斯写给爱因斯坦的信。

我们是否应该取笑这个人，说他的结论错了呢？假如我们希望前后保持一致的话，我认为我们并不应该这样做，我们反而应该承认他掌握情况的方式既有道理又不违反已知的力学定律。虽然我们先前认定箱子相对于“伽利略空间”在做加速运动，但我们也可以认定箱子是静止的。于是，我们有了充分的根据将相对性原理推广到相互做加速运动的参照系中，我们也因此获得了关于广义相对性公设的一个有力论据。

我们必须注意到，这种解释方式的可能性是基于重力场使一切物体得到相同的加速度这一基本性质，或者说，是基于惯性质量和重力质量相等这一定律。假如这个自然定律不存在，那么在做加速运动的箱子内的人就不能先假设一个重力场来解释他周围物体的行为，也就没有理由

根据经验假设他的参照系是“静止的”了。

假设箱子里的人在箱盖里面系一根绳子，然后在绳子的另一端拴上一个物体，会使绳子伸长并“垂直地”悬挂着。假如我们问使绳子产生张力的原因，箱内的人会说：“悬垂着的物体在重力场中受到一个向下的力，这个力与绳子的张力相平衡；决定绳子张力大小的是悬垂物体的重力质量。”另一方面，自由地平衡在太空中的观察者会这样解释这一情况：“绳子参与了箱子的加速运动，并将这种运动传递给拴在绳子上的物体。绳子张力的大小恰好足以引起物体的加速度。决定绳子张力大小的是物体的惯性质量。”从这个例子中我们可以看到，我们对相对性原理的推广隐含着惯性质量和重力质量相等这一定律的必然性。由此我们就得到了这个定律的一个物理解释。

通过这个做加速运动的箱子的例子，我们可以发现：一个广义的相对论必然会对各重力定律产生重要的结果。事实上，对广义相对性观念的系统研究，已经补充了重力场所需满足的一些定律。但是，在继续谈下去之前，我必须提醒读者不要接受这些论述所隐含的一个错误观念。对于箱内的人而言，存在着一个重力场，但对最初选定的坐标系而言，并不存在这样的“场”。现在我们可能轻易地假设：重力场的存在永远只是表面上的。我们也可以这样认为，无论存在着什么样的重力场，我们总是能够选取另一个参照系，使得对该参照系而言没有重力场的存在。上述论述并不适用于所有重力场，只适用于那些具有特殊形式的重力场。例如，我们不可能选取一个参照系，使得以这个参照系判定时地球的重力场（就其整体而言）会消失。

现在我们可以认识到，为什么我们在第18节末尾提出的反对广义相对性原理的论据无法令人信服。火车车厢内的观察者由于刹车而感受到一个向前的拉力，并由此察觉到车厢的非匀速运动（阻滞），这一点当然是真实的，但是谁也没有强迫他将拉力归因于车厢的“实在的”加速度（阻滞）。他也可以这样解释他的经验：“我的参照系（车厢）一直保持静止。但是，相对于这个参照系（在刹车期间）存在着一个向前且随时间改变的重力场。在这个重力场的影响下，路基连同地球以这样的方式做非匀速运动，即它们向后的原有速度正在不断递减。”

21. 经典力学和狭义相对论的基础在哪些方面无法令人满意？

我们已经数次提及经典力学源于下列定律：离其他质点足够远的质点继续做匀速直线运动，或继续保持静止状态。我们也曾一再强调，这个基本定律只对一群具有某些特定运动状态，且彼此做匀速平移运动的参考体K才成立。相对于其他参照系K'[1]，这个定律就不成立。所以我们在经典力学和狭义相对论中都将参照系K和参照系K'区分开：相对于参照系K，公认的“自然定律”可以说是成立的；但相对于参照系K'，这些定律就不成立。

但凡是思想方法合乎逻辑的人，谁也不会满足于这种状况。他会问：“为什么要认定某些参照系（或它们的运动状态）比其他参照系（或它们的运动状态）更优越呢？怎么会有这种理由呢？”为了讲清楚我提出这个问题的意思，我来举一个例子。

1916年，爱因斯坦发表于《物理年鉴》（Annals of Physics）的《广义相对论的基础》的手稿，他在这篇文章中第一次系统地阐释了广义相对论。

我站在一个煤气灶前面，灶上并排放着两口平底锅，两口锅非常相像，很容易让人认错，且两口锅中都盛着一半的水。我注意到一口锅不断冒出蒸汽，而另一口锅则没有。即使我以前从来没有见过煤气灶或者平底锅，我也会对这种情况感到奇怪。但假如这时我注意到在第一口锅底下有一种蓝色的发光物，而在另一口锅底下则没有，那么我就不会再感到惊讶，即使我以前从来没见过煤气火焰。因为我只要说是这个蓝色

的物质使锅里冒出蒸汽，或至少可能是如此。但假如我注意到两口锅底下都没有什么蓝色的物质，并且假如我还观察到其中一口锅不断冒出蒸汽而另一口锅没有，那么我会一直感到惊讶和不满足，直到我发现某种情况可以说明这两口锅的不同。

同理，我在经典力学（或在狭义相对论）中找不到一个实在的东西，能够用来说明为什么相对于参照系K和K'来思考时，物体会有不同的表现[2]。牛顿看到了这一缺陷并曾试图消除它，但并没有成功。只有马赫[3]对它看得最清楚，而且因为这一缺陷，他宣称必须将力学置于一个新基础上。只有借助与广义相对性原理一致的物理学，才能消除这个缺陷，因为这一理论的方程式对于一切参照系来说，不论其运动状态如何，都是成立的。

1　这里的K'原文作K，为表示区别改为K'，以下不再说明。——译者注

2　这一缺陷在下列情况中尤为严重，即当参照系的运动状态无需任何外力维持时，例如当参照系正在做匀速运动的情况。

3　恩斯特·马赫（Ernst　Mach）：1838—1916年，奥地利物理学家、哲学家，他的著作对爱因斯坦产生了深远的影响。——译者注

22. 广义相对性原理的几个推论

第20节的论述表明，广义相对性原理能够使我们以纯理论方式，导出重力场的性质。举例来说，假设我们已知一个发生在伽利略区域（Galilean domain）中的自然过程，并且已知它相对于一个伽利略参照系K是如何发生的，也就是说，已经知道该自然过程的时空“进程”（spacetime　"course"）；借助纯理论运算（也就是只通过计算），我们就能从一个相对于K做加速运动的参照系K'来观察这个自然过程的表现。但是由于对这个新的参照系K'而言，存在着一个重力场，所以以上的例子也会告诉我们，重力场是如何影响研究过程的。

例如，一个相对于K（按照伽利略定律）做匀速直线运动的物体，它相对于做加速运动的参照系K'（箱子）是在做加速运动，且一般是曲线运动。这种加速度或曲率（curvature）相当于相对于K'存在的重力场对运动物体的影响。人们已经知道重力场会以这种方式影响物体的运动，因此以上思考过程并没有为我们提供任何本质上的新结果。



1917年7月，爱因斯坦的两个儿子：汉斯和爱德华，摄于阿罗萨（Arosa）。

然而，当我们对一道光线进行类似的思考时，将得到一个重要的新结果。相对于伽利略参照系K，这样的一道光线沿直线以速度c传播。容易证明，当我们相对于做加速运动的箱子（参照系K'）来思考同一道光线时，它的路径不再是一条直线。由此我们得出结论：光线在重力场中一般沿曲线传播。这一结果在两个方面具有重大意义。

首先，这个结果可以和实际进行比较。虽然对这一问题的详尽研究表明，按照广义相对论，光线穿过我们在实际上可以利用的重力场时，只有极其微小的曲率；但是以掠入射（grazing incidence）方式经过太阳的光线，其曲率的估算值达到1.7"（弧秒）。这应该是以下列方式表现出来。

从地球上观察，某些恒星看起来是在太阳附近，因此在日全食时，

我们能够观测到这些恒星。此时，这些恒星在天空的视位置与它们当太阳位于天空其他部位时的视位置相比应该偏离太阳，偏离的数值如上所示。检验这个推断是否正确是一个极其重要的问题，希望天文学家能够尽早解决。4

其次，我们的结果表明，依据广义相对论，我们时常提到的作为狭义相对论的两个基本定律之一，即光在真空中速度恒定这个定律，就不能被认为具有无限的有效性。光线的弯曲只有在光的传播速度随位置而改变时才会发生。或许我们会认为，由于这种情况，狭义相对论甚至整个相对论都将化为灰烬。但实际上并非如此，我们只能得出这样的结论：狭义相对论的有效性并不是无止境的，只有当我们不必考虑重力场对现象（例如光的现象）的影响时，狭义相对论的结果才成立。

由于反对相对论的人时常争辩说狭义相对论被广义相对论推翻了，因此用一个适当的例子来将这个问题的实质讲清楚也许就很有必要了。在电动力学发展之前，静电学定律被看作是电学定律。现在我们知道，只有在电质量彼此之间以及它们相对于坐标系完全保持静止的情况下——这是永远无法严格实现的——才能够从静电学的角度思考并正确地推导出电场。我们是否可以说，由于这个理由，静电学被电动力学的麦克斯韦场方程推翻了呢？绝对不可以。静电学作为一种极限情况被包含在电动力学中；在场不随时间而改变的情况下，可直接从电动力学的定律得出静电学定律。任何物理理论都不可能有比这更好的命运了，即一个理论本身指出创立一个更为全面的理论的道路，而在这个更为全面的理论中，原来的理论作为一种极限情况会继续存在下去。

11. XI. 1918

Meine Lieben!

Das Grosse ist geschehen! Ich hatte jeglichen Zusammenbruch der Ordnung befürchtet. Aber bis jetzt ist die Bewegung wahrhaft imposant verlaufen, das grösste äussere Erlebnis, was denkbar war. Und was das drolligste ist: die Menschen finden sich merkwürdig leicht darein. Dass ich das erleben durfte!! Keine Pleite ist so gross, dass man sie nicht gerne in Kauf nähme um so einer herrlichen Kompensation willen. Bei uns ist der Militarismus und der Geheimratsdusel gründlich beseitigt.

Herzlichen Glückwunsch übrigens zu Deinem Geburtstag l. Maja. Wenns möglich ist, schicke ich Dir auch ein bisserl was.

Uns geht es bisher allen gut, auch gesundheitlich.

Beste Grüsse von Euerm

Albert.

Ilse, die eine Blutrote ist, kam gestern in einen [illegible] hinein und gab Fersengeld.

A. Einstein Archive
29-388

1918年11月9日，爱因斯坦在笔记本上标注“（讲座）因革命取消了”。两天后，他满怀热情地告诉妹妹玛雅和妹夫保罗柏林政府被推翻的消息。图中是1918年11月11日爱因斯坦寄给妹妹和妹夫的明信片。

在刚才讨论的关于光传播的例子中，我们已经看到，广义相对论使我们能够从理论上推导出重力场对自然过程进程的影响，这些自然过程的定律在重力场不存在时就是已知的。但最引人注意的问题是关于对重力场本身所满足的定律的研究，广义相对论为这个问题的解答提供了线索。

我们已经熟悉在适当选取参照系之后（近似地）处于“伽利略”形式的时空区域，也就是不存在重力场的区域。假如我们相对于一个不论做何种运动的参照系K'来思考这一区域，那么相对于K'就存在一个重力场，这个重力场对于空间和时间是可变的。5这个重力场的特性取决于为K'选定的运动。依据广义相对论，所有能够按照这种方式得到的重力场都必须满足普遍的重力场定律。虽然绝不是所有重力场都能通过这种方式产生，但我们仍然可以期待普遍的重力定律，能够由一些特殊重力场推导出来。这个期待已经以最美妙的方式实现了，但从看清这个目标到真正实现它，必须克服一个严重的困难。由于这个问题具有深刻的意义，我不敢对读者略而不谈。我们必须进一步推广我们对时空连续体的概念。

4　理论所要求的光线偏转，首次于1919年5月29日的日食期间，被英国皇家学会和皇家天文学会的一个联合委员会所组建的两支远征观测队的摄影星图所证实（见附录一第3节）。

5　这一点可由第20节的讨论推导得出。

23. 在转动参照系上的钟与量杆的行为

到目前为止，我在广义相对论中故意避免谈到空间数据和时间数据的物理解释。因此，我在论述中犯了一些潦草处理的错误，我们从狭义相对论知道这绝非无关紧要或可被原谅，而现在正是弥补这个缺陷的恰当时刻。但在开始前我需要提一点，这个问题非常考验读者的耐心和抽象能力。

我们还是从以前常引用的十分特殊的例子开始。让我们想象一个时空区域，这里对一个其运动状态已适当选定的参照系K而言，并不存在重力场。就我们想象的区域而言，K就是一个伽利略参照系，并且狭义相对论的结果对于K是成立的。假设我们参照另一个参照系K'来思考同一个区域，K'相对于K做匀速运动。为了使我们的观念更明确，我们设想K'具有平面圆盘的形状，这个圆盘在其自身的平面内，绕其中心做匀速

转动。在圆盘K'上离开盘心而坐的一名观察者，会感受到沿径向向外作用的一个力，相对于原来的参照系K保持静止的一名观察者，曾把这个力解释为一种惯性效应（离心力）。但坐在盘上的观察者可以将他的圆盘当作“静止的”参照系；依据广义相对性原理，他是可以这样想的。他曾把作用在自己身上以及事实上作用在所有其他相对于圆盘保持静止的物体的力，看作是一个重力场的效应。然而，按照牛顿的重力理论，这个重力场的空间分布是不可能的。6但是由于这个观察者相信广义相对论，所以这一点并没有对他产生困扰；他有十分正常的理由相信能建立起一个普通的重力理论——这个定律不仅可以解释众星的运动，还可以解释观察者自身所感受到的力场。

27. IX. 19

Liebe Mutter!

Heute eine freudige Nachricht. H. A. Lorentz hat mir telegraphiert, dass die englischen Expeditionen die Lichtablenkung an der Sonne wirklich bewiesen haben. Maja schreibt mir leider, dass Du nicht nur viel Schmerzen hast, sondern dass Du Dir auch noch trübe Gedanken machst. Wie gern würde ich Dir wieder Gesellschaft leisten, dass Du nicht dem hässlichen Grübeln überlassen wärest! Aber eine Weile werde ich doch hier bleiben müssen und arbeiten. Auch nach Holland werde ich für einige Tage fahren, um mich Ehrenfest dankbar zu erweisen, obwohl der Zeitverlust recht schmerzlich ist.

1919年9月27日，爱因斯坦母亲的身体每况愈下，他赶忙写信分享尚未公布的科学事件：天文学家阿瑟·爱丁顿（Arthur Eddington）和他的团队拍摄的照片证明了自己的预测是正确的。

这位观察者在他的圆盘上用钟和量杆来做实验。他这样做的意图是要得出确切的定义，来表达相对于圆盘K'的时间数据和空间数据的含义，这些定义是以他的观察为基础的。他这样做将会获得怎样的经验呢？

首先，他取来两只构造完全相同的钟，一只放在圆盘中心，另一只放在圆盘边缘，此时它们相对于圆盘是保持静止的。我们现在问自己，从非转动的伽利略参照系的角度来看，这两只钟是否走得一样快？从这个参照系来判断，放在圆盘中心的钟并不具有速度，而由于圆盘的转动，放在圆盘边缘的钟相对于K是运动的。根据第12节得出的结果可知，第二只钟永远比放在圆盘中心的钟走得慢，也就是说，从K来观察情况将会如此。显然，我们设想的坐在圆盘中心那只钟旁边的观察者，也会察觉到同样的效应。因此，在我们的圆盘上，或者把情况说得更普遍一些，在每一个重力场中，一只钟走得快或走得慢，要看它（静止地）所放的位置在哪里。由于这个原因，要借助相对于参照系静止放置的钟来得出合理的时间定义是不可能的。我们想要在这样一个例子中引用我们早先的同时性定义也曾遇到过同样的困难，但我不想再进一步讨论这个问题。

此外，在这个阶段，空间坐标的定义也遇到了无法克服的困难。假如这名观察者将他的标准量杆（与圆盘半径相比一根很短的杆）沿切线方向置于圆盘边上，那么从伽利略坐标系来判定，这根杆的长度将小于1，因为依据第12节，运动的物体在运动的方向上会发生收缩。另一方面，如果将量杆沿半径方向置于圆盘上，从K来判定时，量杆并不会缩短。那么，假如这名观察者用他的量杆先量出圆盘的圆周，然后量出圆盘的半径，两者相除，他所得到的商将不会是大家熟知的数$\pi = 3.14$……，而是一个较大的数[7]；当然，如果圆盘与K保持相对静止，上述操作一定会得出π。这就证明，在转动的圆盘上，或者普遍地说在一个重力场中，欧几里得几何学的命题严格上并不能成立，至少当我们把量杆在所有位置和每一个取向的长度都当成1的时候就会如此。

因此，直线的观念也就会失去意义。所以我们无法借助于在讨论狭义相对论时所使用的方法，相对于圆盘K来下坐标x、y、z的定义；但只要事件的坐标和时间尚未定义，我们就无法给事件中出现的任何自然定律赋予严格的意义。

这样，我们以前基于广义相对论得出的所有结论可能都有问题。事实上，我们必须做一个巧妙的迂回，才能精确地应用广义相对论的公设。我将在以下几节中帮助读者做好这方面的准备。

6　这个重力场在圆盘的中心消失，且场值由中心向外增大并与距中心的距离成正比。

7　在整个讨论的过程中，我们必须使用伽利略（无转动的）坐标系K作为参照系，因为我们只能假设狭义相对论的结果相对于K才有效（相对于K'有一个重力场存在）。

24. 欧几里得与非欧几里得连续区

我的面前是一张大理石桌的桌面。在桌面上，我可以按下列方式从任意一点到其他任意一点，即连续地从一点移到“邻近的”一点，并重复这个过程若干（许多）次，换句话说，即不需要从一点“跳跃”到另一点。我相信读者一定能够清楚地了解，我在这里所说的“邻近的”和“跳跃”是什么意思（假如他不过于咬文嚼字的话）。我们将桌面描述为一个连续体来表示桌面的上述性质。

我们设想已经做好了许多长度相等的小杆，它们的长度比这块大理石板的大小短很多。这些小杆的长度相等，也就是说，把其中一根与任意一根叠放起来，它们的两端都能重合。其次，我们取四根小杆放在大理石板上构成一个四边形（正方形），这个四边形的对角线是等长的。为保证对角线的长度相等，我们另外还用了一根小测杆（testing-rod）。我们在这个正方形的四边各加上一个相同的正方形，加上的每

一个正方形都有一根与原来的正方形共用的杆。我们继续这样摆放正方形，直到最后整块大理石板都铺满了正方形为止。最终所有正方形是这样排列的：一个正方形的每一边都属于两个正方形，而每一个角（corner）都属于四个正方形。

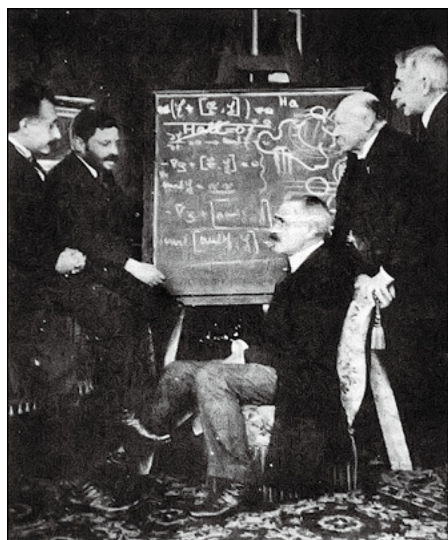


1919年，爱因斯坦与其表姐爱尔莎结婚。

我们可以完成上述工作却没有遇到极大的困难，还真是一个奇迹。我们只需想一想下列情况。任何时刻只要三个正方形相会于一个角，那么第四个正方形的两边就已经摆出，因此这个正方形余下两边的排列位置也就已经完全决定下来。但此时我就不能再调整这个四边形使它的两根对角线等长了。如果这两根对角线自然而然等长，那么这是大理石板和小杆的特别恩赐，对此我只能怀着感激的心情惊讶不已。假如前文描述的作图法能够成功的话，我们必然会经历许多次这样令人惊奇的事情。

假如凡事都能真正顺利地进行，那么我就说大理石板上的各点对于曾被当作距离（线段）使用的小杆而言构成了一个欧几里得连续体。选取一个正方形的一个角作为“原点”，我就能用两个数来表示任意一个正方形的任意一个角相对于这个原点的位置。我只需说明，从原点出发先向“右”走再向“上”走，必须经过多少根杆子才能到达所选的正方形的角。这两个数就是这个角相对于由小杆的排列而确定的“笛卡尔坐标

系”的“笛卡尔坐标”。



1920年，爱因斯坦（左一）与朗之万（右三）等人。

假如将上述抽象实验进行如下改变，我们知道这个实验必然无法在某些情况下成功。我们假设这些杆子会“膨胀”，膨胀的量值与温度升高的量值成正比。我们加热大理石板的中心部分，但不加热周围；在这种情况下，我们仍然能够使两根小杆在桌面的任意位置上重合。但在加热期间我们的正方形作图法必然会受到影响，因为放在桌面中心部分的小杆膨胀了，而放在外围部分的小杆则没有膨胀。

对于我们的小杆（定义为单位长度）而言，这块大理石板不再是欧几里得连续体，并且我们也不能再直接借助于这些小杆来定义笛卡尔坐标，因为上述作图法已无法实现。但由于其他一些事物并不会像这些小杆一样受到桌子温度的影响（或许丝毫不受影响），因此我们可以十分自然地支持这块大理石板仍是一个“欧几里得连续体”这种观点。倘若我们对长度的度量或比较进行了更巧妙的约定，则能够以令人满意的方式实现上述目标。

但是，如果将各种杆子（也就是用各种材料制作的杆子）放在不均匀加热的大理石板上时，它们对温度的反应都一样，并且假如我们除了杆子在与上述实验相类似的实验中的几何行为之外，没有其他的方法来

探测温度的效应，那么最好的办法就是：只要我们使一根杆子的两端与石板上的两端相重合，我们就规定这两点间的距离为1；因为除此之外，我们又应该如何来定义距离，才不至于在极大程度上犯粗略任意的错误呢？于是我们必须舍弃笛卡尔坐标的方法，而代之以一种假设欧几里得几何学不通用于刚体的方法。8读者会注意到，这里描述的局面与广义相对性原理导致的局面（第23节）是一致的。

8　我们的问题也曾出现在数学家面前。假设我们给定一个欧几里得三维空间中的面（例如椭球面），那么对于这个面正如同对于一个平面那样，存在着一种二维几何学。高斯曾试图从若干第一原理（first principle）出发来论述这种二维几何学，而不利用这个面是属于欧几里得三维连续体这一事实。如果想利用刚性杆在这个面上作图（与上述在大理石板上作图类似），我们就会发现：适用于这些作图法的定律，与那些基于欧几里得平面几何学得出的定律不同。这个面对于这些杆而言并不是一个欧几里得连续体，因此我们不可能在这个面上定义笛卡尔坐标。高斯指出了处理这个面上的几何关系的原则，从而指明了引向黎曼（Riemann）处理多维非欧几里得连续体方法的道路。所以，数学家在很早以前就已经解决了广义相对性公设所引起的形式问题。

25. 高斯坐标

按照高斯9的论述，我们可以按照下面的例子v来实现将分析方法与几何方法结合起来的问题处理方式。我们设想在桌面上画有一个任意曲线系（见图4）。我们称这些曲线为u曲线（u-curves），并用数字来表示每一条曲线。

图中画出了曲线u＝1、u＝2和u＝3。我们设想在曲线u＝1和u＝2之间还画有无限多条曲线，这些曲线都可以用1和2之间的实数来表示。这样我们就会得到一个u曲线系，而且这个“无限密集”曲线系布满了整个桌面。这些曲线彼此不能相交，即桌面上的每一点都必须有且仅有一条u曲线通过，因此大理石桌面上的每一个点都具有一个完全确定的

值。我们再设想以同样方式在这个桌面上画一个v曲线系。这些v曲线所满足的条件与u曲线相同，每一条曲线也同样用数字来表示，并且它们同样也可以具有任意形状。于是，桌面上的每一个点都会有一个u值和一个v值，我们称这两个数为桌面的坐标（高斯坐标，Gaussian co-ordinate）。例如，图中P点的高斯坐标为u＝3，v＝1。桌面上相邻的两点P和P'就对应于坐标

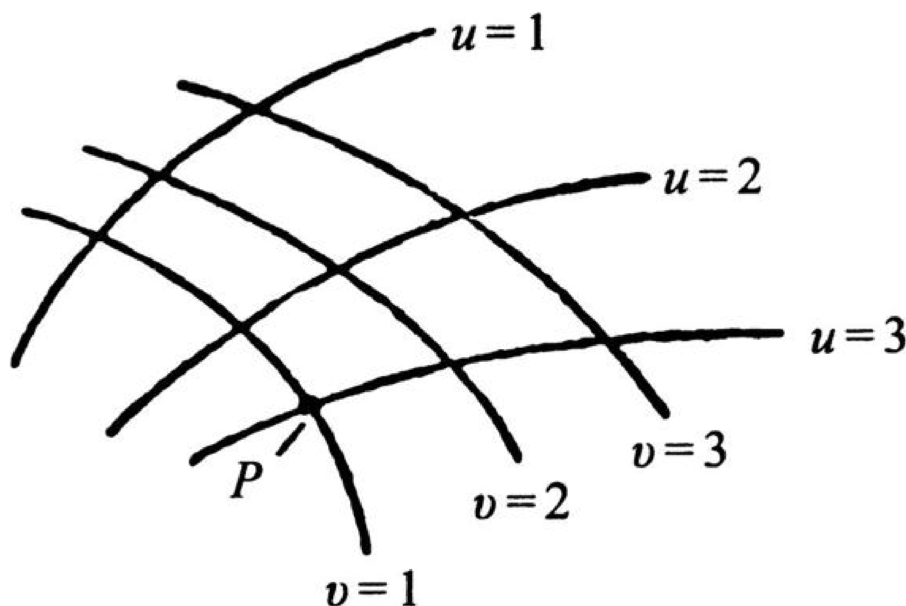


图 4

P：u，v

P'：u＋du，v＋dv

式中du和dv表示很小的数。同样，我们可以用一个很小的数ds来表示用一根小杆量得的P和P'之间的距离（线间隔，line-interval）。于是，依据高斯的论述，我们得到了

$$ds^2 = g_{11}du^2 + 2g_{12}dudv + g_{22}dv^2$$

式中g_{11}、g_{12}、g_{22}完全取决于u和v的量。g_{11}、g_{12}、g_{22}的量决定了

小杆相对于u曲线和v曲线的行为，因此也就决定了小杆相对于桌面的行为。只有在例子中的桌面上的各个点相对于量杆构成一个欧几里得连续体的情况下，我们才能简单地按照下式来画出并用数字表示出u曲线和v曲线：

$$ds^2 = du^2 + dv^2$$

在这样的条件下，u曲线和v曲线就是欧几里得几何学中的直线，而且它们相互垂直。此处的高斯坐标也就是笛卡尔坐标。显然，高斯坐标不过是两组数与所考虑的平面中各点的一种缔合（association），这种缔合具有如下性质，即彼此相差很微小的数值与“空间中”各相邻点相缔合。



爱因斯坦在柏林的书房。

到目前为止，以上论述适用于二维连续体。但是高斯的方法也可以应用于三维、四维甚至更高维的连续体。举例来说，假如我们有一个四维连续体，我们就可以用下列方法来表示这个连续体。对于这个连续体中的每一个点，我们任意用四个数与它相缔合，这四个数就被称为“坐标”。相邻的点对应于相邻的坐标值。假如距离ds与相邻点P和P'相缔合，并且从物理学的观点来看这一距离是可以被测量且明确定义的，那么下式成立：

$$ds^2 = g_{11}dx_1^2 + 2g_{12}dx_1dx_2 + \ldots + g_{44}dx_4^2$$

式中g^{11}等量的值随连续体中的位置变化而变化。只有当这个连续体是一个欧几里得连续体时，才有可能将坐标x_1，…，x_4与这个连续体中的点简单地缔合起来，使得我们有：

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2$$

在这种情况下，适用于这个四维连续体的关系式会与适用于三维测量的关系式相类似。

然而，我们在上面给出的表述ds^2的高斯方法并非总是成立的。只有当所考虑的连续体中足够小的区域可以被视为欧几里得连续体时，上述方法才适用。比方说，就大理石桌面和局部温度变化的例子而言，这一点显然成立。对于石板的一小部分而言，温度实际上可当作恒量；因而小杆的几何行为几乎能够符合欧几里得几何学的法则。因此，上节所述的正方形作图法的缺陷，要到这些图扩展到占桌面相当大的部分时，才会明显表现出来。

至此，我们可以这样总结：高斯发明了一般连续体的数学表述方法，其中定义了“大小关系”（size-relation，即相邻点间的“距离”）。对连续体中的每个点都可以用若干个数（高斯坐标）表示出来，连续体有多少个维度就用多少个数来表示。因为每个点所标出的数只能有一个意义，并且相邻各点应该用彼此相差一个无穷小量的数（高斯坐标）来表示。高斯坐标系是笛卡尔坐标系的一个合乎逻辑的推广。高斯坐标系也可以适用于非欧几里得连续体，但只有在下列情况中才可以：相对于所定义的“大小”或“距离”而言，当我们所考虑的连续体的各个小部分越小时，其行为就会越像一个真正的欧几里得系统（Euclidean system）。



1920年，爱因斯坦与他的朋友们在挪威奥斯陆附近的森林中野餐。

9　卡尔·弗里德里希·高斯（Carl　Friedrich　Gauss）：1777—1855年，德国数学家、天文学家、物理学家。——译者注

26. 狭义相对论的时空连续体可视为欧几里得连续体

我们现在可以更为精确地表述闵可夫斯基的观念——这个在第17节中被含糊提及的观念。依据狭义相对论，我们需要优先使用某些坐标系来描述四维时空连续体，这就是“伽利略坐标系”。我们已经在本书第一部分详细讲述过，如何在这些坐标系中确定一个事件，或者说如何确定四维时空连续体中一个点所用的坐标x、y、z、t在物理学中具有的简单定义。从一个伽利略坐标系过渡到相对于这个坐标系做匀速运动的另一个坐标系时，洛伦兹变换方程是成立的，这些洛伦兹变换方程最终构成了从狭义相对论导出推论的基础，而这些方程本身只是表述了光传播定律对于一切伽利略参照系的普遍有效性。

闵可夫斯基发现，洛伦兹变换满足下列简单条件。我们来思考两个相邻事件，它们在四维连续体中的相对位置参照伽利略参照系K，用空

间坐标差dx、dy、dz和时间差t来表示。我们假设这两个事件相对于另一个伽利略坐标系的差相应地为dx'、dy'、dz'和dt'。那么这些量总是会满足下列条件[10]

$$dx^2+dy^2+dz^2-c^2dt^2=dx'^2+dy'^2+dz'^2-c^2dt'^2$$

洛伦兹变换的有效性就是由上述条件来确立的。我们还可以将其表述如下：属于四维时空连续体的两个相邻点的这个量

$$ds^2=dx^2+dy^2+dz^2-c^2dt^2$$

一切选定的（伽利略）参照系都具有相同的值。假如我们用x1、x2、x3、x4代替x、y、z、$\sqrt{-1}ct$，我们也会得出这样的结果，即

$$ds^2=dx_1^2+dx_2^2+dx_3^2+dx_4^2$$

与参照系的选取无关。我们将量ds称为两个事件或两个四维点之间的“距离”。

因此，倘若我们不选取实量t，而选取虚变量$\sqrt{-1}ct$作为时间变量，我们就可以根据狭义相对论将时空连续体视为一个“欧几里得”四维连续体，这一结果可由前节的论述推出。

10　参见附录一第1节和第2节。在附录中从坐标本身导出的关系式，对于坐标差也是成立的，因此对于坐标微分（无穷小的差）也是成立的。

27. 广义相对论的时空连续体不是欧几里得连续体

在本书的第一部分，我们可以使用一个具有简单且直接的物理解释的时空坐标，依据第26节的内容，这种时空坐标可以被看作四维笛卡尔坐标，而我们这样做是以光速恒定定律为基础的。但依据第21节的内

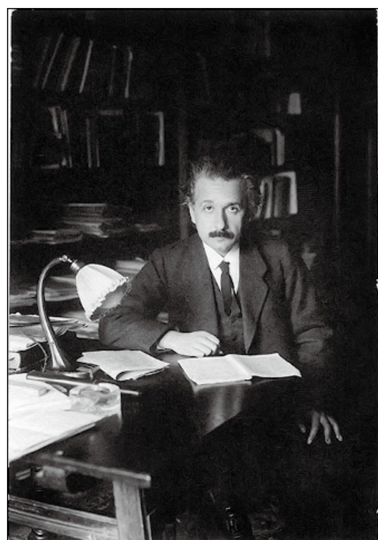
容，广义相对论无法保持这一定律。与此相反，我们根据广义相对论会得出下列定律：当存在一个重力场时，光速必定总是取决于坐标。在第23节讨论一个具体例子时，我们发现曾经引导我们到狭义相对论的目标的那种坐标和时间的定义，由于重力场的存在而失效了。

鉴于这些论述的结果，我们可以得出以下论断：依据广义相对性原理，时空连续体不能被视为一个欧几里得连续体；在这里只有相当于具有局部温度变化的大理石板的普遍情况，我们曾将它理解为一个二维连续体的例子。正如在例子中不能用等长的杆构成一个笛卡尔坐标系一样，在这里也不可能用刚体和钟构成这样一个系统（参照系），使量杆和钟在彼此作刚性安排的情况下，用来直接指示位置和时间。这就是我们在第23节中遇到的困难的实质所在。

但是第25节和第26节中的论述为我们指出了克服这一困难的道路。对于四维时空连续体，我们可以任意借助高斯坐标来作为参照。我们用四个数x1、x2、x3、x4（坐标）来表示连续体的每一个点（事件），这些数不具有任何直接的物理意义，其目的只是用一种明确而又任意的方式来表示连续体中的各点。四个数的排列方式甚至不一定要将x1、x2、x3当作“空间”坐标，也不一定要将x4当作“时间”坐标。

读者可能会认为这样描述世界并不恰当。假如x1、x2、x3、x4这些坐标本身并没有意义，那么用它们表示一个事件又是什么意思呢？但是，更加仔细的思考表明，这种担忧并无根据。例如，我们思考一个正在做任意运动的质点，假如这个点的存在只是瞬时且并未持续一段时间，那么它在时空中就由单独一组x1、x2、x3、x4的数值来表示。假如这个点的存在是永久的，那么要描述它就需要用无穷多组这样的数值，且这些坐标值必须紧密到足以显示出连续性；对应于这个质点，我们就有了四维连续体中的一条（一维）线。同样，在我们的连续体中任何这类线都对应到许多运动中的点。对于这些点的陈述，事实上只有关于它们交会（encounter）的那些陈述，才称得上具有物理存在的意义。在我们的数学论述中，对于这种交会的表述就是两条代表点的运动的线中，各有一组特定的坐标值x1、x2、x3、x4是彼此共有的。经过深思熟虑后，读者可能会承认，事实上这种交会组成了我们在物理陈述中遇到的具有时空性质的唯一真实的证据。

当我们相对于一个参照系来描述一个质点的运动时，我们所陈述的只不过是这个点与这个参照系上一些特定点的交会。我们也可以通过观察物体和钟的交会，连同观察钟的指针与标度盘上特定点的交会来确定相应的时向值。使用量杆进行空间测量时也正是如此，只要稍加思考就会明白这一点。



1920年，爱因斯坦在柏林大学的办公室里。

以下陈述是普遍成立的：每个物理描述本身可分为若干个陈述，每个陈述都涉及A、B两起事件的时空重合（space-time coincidence）。从高斯坐标的角度来说，每个这样的陈述都由两起事件的四个坐标x1、x2、x3、x4表示。实际上，使用高斯坐标对时空连续体的表示方式，可以完全取代借助于—个参照系的表示方式，并且由于前一种表示方式不必受限于所表示的连续体的欧几里得特性，因此也没有后一种表示方式的缺点。

28. 广义相对性原理的严格表述

现在我们可以提出广义相对论的严格表述来代替第18节中的暂时表述。第18节中所用的表述为："对于描述自然现象（表述普遍的自然定

律）而言，不论它们的运动状态如何，所有参照系K、K'等都是等效的。”这种表述已无法维持，因为依据狭义相对论中的方法，使用刚性参照系进行时空描述，一般来说是不可能的，必须用高斯坐标系代替参照系，下面的陈述才与广义相对性原理的基本观念相一致：“所有的高斯坐标系对于表述普遍的自然定律在本质上是等价的。”

我们还可以用另一种形式来陈述这个广义相对性原理，这种形式比狭义相对性原理的自然推广形式更使人明白易懂。依据狭义相对论，当我们使用洛伦兹变换，以一个新的参照系K'的时空变量x'、y'、z'、t'代换一个（伽利略）参照系的时空变量x、y、z、t时，表述普遍自然定律的方程经变换后，仍保留同样的形式。另一方面，依据广义相对论，对高斯变量x_1、x_2、x_3、x_4作任意代换，这些方程经变换后，仍保留同样的形式；因为每一种变换（不仅仅是洛伦兹变换）都相当于从一个高斯坐标系过渡到另一个高斯坐标系。

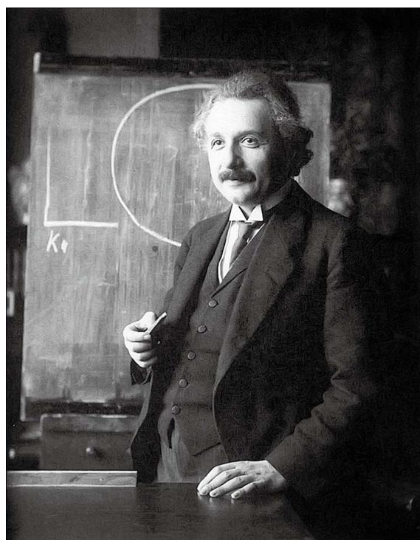
倘若我们愿意执着于“旧时代”对事物的三维观点，那么我们就可以这样描述广义相对论的基本观念所带来的发展：狭义相对论与伽利略区域有关，也就是和其中不存在重力场的区域有关。就此而论，一个伽利略参照系可以作为一个参照系（a Galilean reference-body serves as body of reference），这个参照系是一个刚体，选择其运动状态时必须使“孤立”质点做匀速直线运动的伽利略定律相对于这一刚体是成立的。

从某些角度来看，我们似乎也应该将同样的伽利略区域引入到非伽利略参照系中。那么相对于这些参照系就存在着一种特殊的重力场。

在重力场中并不存在具有欧几里得性质的刚体，因此虚构的刚性参照系在广义相对论中是没有用的。钟的运动也受到重力场的影响，由于这种影响，直接借助于钟而作出的关于时间的物理定义不可能达到狭义相对论中同等程度的真实性。

由于上述原因，我们使用非刚性参照系，就整体来看，不仅它们的运动是任意的，而且在其运动中可以发生任意形变。钟的运动定律可以是任意的，无论如何不规则，它都可用来定义时间。我们想象每一个这样的钟都固定在非刚性参照系上的某一点上，这些钟只满足一个条件，即从（空间中）相邻的钟同时观测到的“读数”彼此仅相差一个无穷小的

量。这个可以被恰当地称为“软体动物参考物”（reference-mollusc）的非刚性参照系，基本上相当于一个任意选定的高斯四维坐标系。与高斯坐标系相比，这个“软体动物”更容易被理解之处是在形式上保留了空间坐标和时间坐标的分立状态（这种保留实际上并不合理）。这个“软体动物”上的每一个点都可以看作是一个空间点，只要我们将这个“软体动物”视为参照系，那么相对于它保持静止的每一个质点就都可以被认为是静止的。广义相对性原理要求所有“软体动物”都可以作为参照系来表述普遍的自然定律，而这些“软体动物”都有同等的权利，可以获得同样好的结果；这些定律本身必须与“软体动物”的选择无关。



1921年，爱因斯坦于维也纳的演讲。（F. Schmutzer摄）

由于我们在上文所看到的结果，广义相对性原理对自然定律做了广泛而明确的限制，这一原理的巨大威力就在于此。

29. 在广义相对性原理的基础上求解重力问题

倘若读者已经了解了前文的论述，那么理解重力问题的解法时将不再有困难。我们从思考一个伽利略区域开始，伽利略区域就是相对于伽利略参照系K但不存在重力场的区域。量杆和钟相对于K的行为可以从狭

义相对论得知；“孤立”质点的行为也是已知的，会沿直线做匀速运动。

我们现在参照作为参照系K'的任意一个高斯坐标系，或者一个“软体动物”来思考这个区域。那么，相对于K'就存在一个重力场G（一种特殊的重力场）。我们只用数学变换就可以得知量杆和钟以及自由运动的质点相对于K'的行为。我们将这种行为解释成量杆、钟和质点在重力场G的影响下的行为。这里我们引进下列假设：重力场对量杆、钟和自由运动的质点的影响，将按照同样的定律继续发生下去，即使目前存在的重力场还不能只通过坐标变换就从伽利略的特殊情况中推导出来。

下一步是研究重力场G的时空行为，G先前只通过坐标变换就能从伽利略的特殊情况中推导出来。这种行为被表述成一个定律，不论在描述中使用的参照系（软体动物）是如何选定的，这个定律始终有效。

然而，这个定律还不是普遍的重力场定律，因为所思考的重力场是一种特殊的重力场。为了求出普遍的重力场定律，我们还需要将上述定律加以推广，这一推广可以根据下列要求得出：

（a）所要求的推广必须也满足广义相对性公设。

（b）假如在所思考的区域中存在任何物质，对其所激发一个场的效应来说，只有它的惯性质量是重要的；根据第15节可知，也就是只有它的能量是重要的。

（c）重力场加上物质必须满足能量（和冲量）守恒定律。

最后，广义相对性原理能够让我们确定重力场对那些不存在重力场时、按已知定律在发生的所有过程的进程影响，这些过程也就是已经被纳入狭义相对论架构的过程。对此，我们原则上按照在论及量杆、钟和自由运动的质点时已经解释过的方法去进行。

按照这一方式从广义相对性公设导出的重力论，其优越之处不仅在于它的完美性，还在于消除经典力学所具有的缺陷和解释了惯性质量和重力质量相等的经验定律，并且它已经解释了经典力学对其无能为力的一个天文观测结果。



1921年4月2日，爱因斯坦第一次访问美国，受到美国人民的热烈欢迎。

假如我们将这一重力论的应用限制于下列情况，即重力场可以被认为是非常弱的，且在重力场内相对于坐标系运动的所有质量的速度与光速比较都是相当小的，那么作为第一近似值（first approximation），我们就得到了牛顿的重力理论。于是在这里不需要任何特别的假设就可以得到牛顿的重力理论，但牛顿当时必须引进这样的假设，即相互吸引的质点间的吸引力必须与质点间距离的平方成反比。假使我们提高计算的精确度，将出现与牛顿理论不一致的偏差，但由于这些偏差相当小，实际上都是[11]观测检验不出来的。

我们在这里必须注意上述偏差中的一个。依据牛顿的理论，行星沿椭圆轨道绕日运行，假如我们能略去恒星本身的运动以及所思考的其他行星的运动，那么这个椭圆轨道相对于恒星的位置将永远维持不变。因此，假如我们能校正所观测的行星运动中这两项因素带来的影响，并且假如牛顿理论是绝对正确的，那么我们就应该得到一个相对于恒星是固定的椭圆行星轨道。这个可以用很高的精确度加以检验推断，除了一颗行星之外，在其他行星那里已经得到了证实，其精确度是目前的观测灵敏度可以达到的最高精度。唯一的例外就是水星——离太阳最近的行星。从勒维耶[12]的时候开始，人们就知道水星的椭圆轨道在校正上述影响后，相对于恒星并不是固定不移的，而是会非常缓慢地在轨道平面内

转动，转动方向与轨道运动同向。人们得到的水星椭圆轨道的转动数值是每世纪43"（弧秒），误差不超过几弧秒。经典力学只能借助一些假设来解释这一效应，而这些假设是不太可能成立的，而且这些假设的提出仅仅是为了解释这个效应。

我们根据广义相对论发现：每颗绕日运行的行星，其在椭圆轨道都必然以上述方式转动；对水星之外的所有行星而言，这种转动都太小了，无法被现今所能达到的观测灵敏度探测到13；但是对水星而言，这个数值达到了每世纪43"，结果也与观测严格相符。

除此之外，迄今只能从广义相对论得出两个可以用观测检验的推论：光线因太阳重力场而发生弯曲14；来自巨大星球的光谱线与在地球上以类似方式产生的（即由同一种原子产生的）光谱线相比，出现了位移现象15。从广义相对论得出的这两个推论都已被证实。

11　现今的。——译者注

12　奥本·尚·约瑟夫·勒维耶（Urbain Jean Joseph Le Verrier）：1811—1877年，法国天文学家。——译者注

13　随着观测技术的进步，其他行星的这种效应也已经被证实了。——译者注

14　由爱丁顿（Eddington）及其他人于1919年首次观测。（参见附录三）

15　1924年被亚当斯（Adams）证实。

第三部分：关于整个宇宙的一些思考

30. 牛顿理论在宇宙学上的困难

31. 一个“有限”而又“无界的”
宇宙的可能性

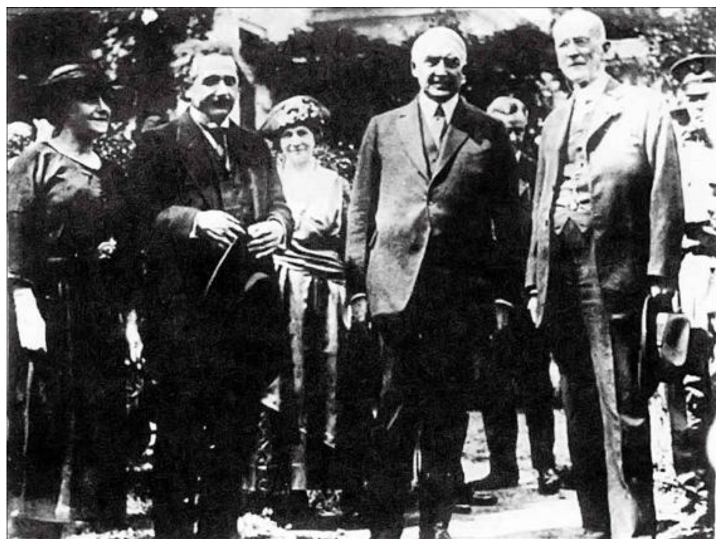
32. 以广义相对论为依据的空间结构

……

30. 牛顿理论在宇宙学上遇到的困难

除了第21节中所讨论的困难之外，经典天体力学还存在另一个基本困难，据我所知，第一个对这个困难进行详细论证的是天文学家西利格[1]。倘若我们仔细思考这样的问题：我们应该如何看待作为整体的宇宙呢？我们想到的第一个答案一定是：就空间（和时间）而言，宇宙是无限的。宇宙中到处都存在着天体，因此物质的密度虽然就细微部分来说变化很大，但平均来看却是到处都一样。换句话说，无论我们在空间中走多远，我们到处都能遇到稀疏的恒星群，其种类与密度大概都是相同的。

上述看法与牛顿的理论是不一致的。牛顿理论要求宇宙应具有某种中心，位于中心的星群密度最大；从中心向外走，天体的群密度（group-density of stars）逐渐减小；直到非常遥远的尽头，成为一个无限的空虚领域。恒星宇宙（stellar universe）应该是无限空间海洋中的一个有限的岛屿。[2]



1921年，美国总统沃伦·哈定（Warren G Harding，前排右二）在华盛顿接见爱因斯坦夫妇。

这个概念本身已无法使人感到满意，而令人更不满意的是，它导致了下述结果：从恒星发出的光以及恒星系中的个别恒星，不断地奔向无限的空间，一去不返，而且永远不再与其他自然客体相互作用。这样一个有限的物质宇宙将注定逐渐而系统地被削弱。

为了避免这种两难局面，西利格对牛顿定律提出了一项修正，其中假设：对于很大的距离而言，两质量之间的吸引力比按照平方反比定律得出的结果减小得更快。这样，物质的平均密度就有可能处处一样，甚至到无限远处也是如此，而不会产生无限大的重力场。如此我们就摆脱了物质宇宙应该具有某种中心等诸如此类令人讨厌的概念的纠缠。当然，我们解决上述基本困难是付出了代价的，即对牛顿定律做了修改并使之复杂化，但这样做既没有经验根据，也没有理论根据。我们能够设想出无数个可以实现同样目的的定律，但不能举出理由说明为什么其中一个定律比其他定律更可取，因为任何一个定律与牛顿定律相比，都没有建立在更为普遍的理论原则上。

1　西利格（Hugo von Seeliger）：1849—1924年，德国天文学家。——译者注

2 证明：依据牛顿的理论，来自无限远处而终止于质量m的“力线”的数目与质量m成正比。若平均而言，质量密度ρ_0在整个宇宙中是一个常数，那么体积为V的球即有平均质量$\rho_0 V$。因此，穿过球面F进入球内的力线数与$\rho_0 V$成正比。对于球面上的单位面积而言，进入球内的力线数将与$\rho_0 \frac{V}{F}$或$\rho_0 R$成正比。因此，随着球半径R的增长，球面上的场强度最终将变为无限大，但这是不可能的。

31. 一个“有限”而又“无界的”宇宙的可能性

但是，对宇宙构造的探索同时还沿着另一个完全不同的方向前进。非欧几里得几何学的发展导致了对于这样一个事实的认知，即我们可以对我们的（宇宙）空间的无限性（infiniteness）表示怀疑，而不会与思维规律或经验发生冲突（黎曼[3]、亥姆霍兹[4]）。亥姆霍兹和庞加莱[5]已经无比清晰详尽地论述了这些问题，我在此只简略地提一下。

首先，我们设想一种二维空间中的存在物（existence），这是一种持有扁平刚性量杆的扁平生物，能在一个平面上自由地移动。对于它们来说，在这个平面之外没有任何东西的存在：它们所观察到的自己和它们的扁平“东西”的所有历程，就是它们的平面所包含的全部实在。具体来说，欧几里得平面几何学中的一切作图都可以借助杆子完成，例如利用第24节中讨论过的格子构图法（lattice construction）。与我们的宇宙对比，这些扁平生物的宇宙是二维的，但也同我们的宇宙一样，可以延伸到无限远处。在它们的宇宙中有足够的空间可以容纳无限多个用杆子构成的彼此完全相同的正方形，即这个宇宙的容积（面积）是无限的。倘若这些生物说它们的宇宙是“平面”，这句话是有意义的，因为它们的意思是它们可以用量杆进行平面欧几里得几何学作图。在这里，个别量杆永远代表同一距离，与其位置无关。

现在让我们思考另一种二维的存在物，不过这次是在一个球面上而不是在一个平面上。这种扁平生物连同它们的量杆及其他物体都完全贴合于这个球面，并且它们不可能离开这个球面。它们所能观察到的整个

宇宙仅能扩展至整个球面。这些生物能否将其宇宙的几何学视为平面几何学，而且它们的杆子又是“距离”的实在体现呢？它们不可能这样做。因为它们认为是直线的东西实际上是一条曲线，我们“三维生物”称这条曲线为大圆（great circle）弧，即具有确定的有限长度的、本身就是完整独立的一条线，其长度可以使用量杆测定。同样，这个宇宙的面积是有限的，可以和用杆子构成的正方形的面积相比较。结合以上条件，我们可以这样认为：这些生物的宇宙是有限的，但又是无界的。



1921年4月2日，爱因斯坦首次访问美国时的合影，左起：本赞·莫森松（Benzion Mossinson）、爱因斯坦、哈伊姆·魏茨曼（Chaim Weizmann）和梅纳赫姆·乌色什金（Mena-hem Ussishkin）。

然而，这些球面生物不必环游它们的世界，就可以感知到它们并不是生活在一个欧几里得宇宙（Euclidean universe）中，它们可以从自己“世界”的各个部分明白这一点，只要它们生活使用的部分不要太小即可。从一点出发，它们可以朝所有方向画等长的“直线”（从三维空间来看则是圆弧），并将这些线的自由端连接成的线称为一个“圆”。依据欧几里得平面几何学，如果用同一根杆子来测量平面上一个圆的圆周与直径的长度，那么两者之比会是一个常数，这个常数与圆的直径大小无关。我们的扁平生物在它们的球面上，会发现圆周与直径之比是这样的：

$$\pi \frac{\sin \frac{r}{R}}{\frac{r}{R}}$$

也就是一个比π小的值。圆半径r与“世界球”（world-sphere）半径R的比值越大，上述比值与π的差值就会越大。借助这个关系，球面生物就能确定它们的宇宙（“世界”）的半径，即使它们能够用来进行测量的仅是它们的世界球中较小的一部分。但由于球面上的微小部分与同样大小的一块平面的差别太过细微，因此如果这部分确实非常小，那么它们就无法证明自己是在一个球面“世界”还是在一个欧几里得平面上。

因此，假如这些球面生物居住在一颗行星上，这颗行星的恒星系只占了球形宇宙（spherical universe）中微不足道的一小部分，那么这些球面生物就无法确定它们居住的宇宙是有限的还是无限的了，因为它们所能接近的“一小块宇宙”在这两种情况下实际上都是平面的，或者说是欧几里得平面。我们可以从这些讨论中直接推得：对于我们的球面生物而言，一个圆的圆周起先随着半径的增大而增大，直到增至“宇宙圆周”为止，其后圆周随着半径值的进一步增大而逐渐减小到零。在这一过程中，圆的面积不断增大，直到最后等于整个“世界球”的总面积为止。

或许读者会觉得奇怪，为什么我们要把我们的生物放在一个球面上，而不是放在另一种闭合曲面（closed surface）上。那是因为，在所有的闭合曲面中，唯有球面具有这样一种性质，即该曲面上的所有点都是等效的。我承认，一个圆的圆周C与其半径r的比值取决于r，但对一个给定的r值而言，这个比值对于“世界球”上的所有点都是一样的；换言之，这个“世界球”是一个“常曲率曲面”（surface of constant curvature）。

对于这个二维球面宇宙，我们有一个三维的进行类比，那就是黎曼发现的三维球面空间，其上的点同样也都是等效的，这个球面空间具有一个有限的体积且由其半径决定（$2\pi^2R^3$）。能否想象一个球面空间呢？想象一个空间意味着我们想象我们的“空间”经验的一个模型，这种“空间”经验是我们在移动“刚性”物体时能体会到的。就此意义而言，我们能够想象一个球面空间。

假设我们在向所有方向画线或拉绳索，并用一根量杆在每条线或绳索上量取距离r，所有这些具有长度r的线或绳索的自由端点都位于一个球面上。我们可以借助一个用量杆构成的正方形，用特别方法测量出这个曲面的面积（F）。假如这个宇宙是欧几里得宇宙，那么$F=4\pi r^2$；假如它是球面宇宙，那么F总是小于$4\pi r^2$。随着r值的增大，F也从0增大到最大，这个最大值是由“世界半径”来确定的；但随着r值的进一步增大，这个面积将逐渐减小到0。起初，从起始点辐射出去的直线彼此散开，并且相距越来越远，但后来又相互趋近，最后它们终于在与起始点相对立的“对立点”（counter-point）上再次相会，它们在这种情况下穿越了整个球面空间。这个三维球面空间与二维球面十分相似，三维球面空间是有限的（即体积是有限的），但同时又是无界的。

可以提一下，还有另一种弯曲空间——“椭圆空间”（elliptical space）。椭圆空间可以被看成是两个“对立点”完全相同的（彼此无法分辨的）一种空间。因此，在某种程度上可以将椭圆宇宙当成是具有中心对称的弯曲宇宙。



诺贝尔奖颁奖晚会上的爱因斯坦和普朗克。

由以上所述可以推知，无界的闭合空间是可能存在的。在这类空间中，球面空间（以及椭圆空间）以其简单性胜过了其他空间，因为其上所有的点都是等同的。以上讨论的结果，为天文学家和物理学家提出了

一个极其有趣的问题：我们居住的宇宙是无限的，还是如球面宇宙那样有限的呢？我们的经验远不足以让我们回答出这个问题。但广义相对论使我们能够以一定程度的确实性回答这个问题，这样，第30节中提到的困难就得到了解决。

3 波恩哈德·黎曼（Georg Friedrich Bernhard Riemann）：1826—1866年，德国数学家。——译者注

4 赫尔曼·冯·亥姆霍兹（Hermann von Helmholtz）：1821—1894年，德国自然科学家，在物理学和生理学上贡献卓著。——译者注

5 朱尔斯·亨利·庞加莱（Jules Henri Poincare）：1854—1912年，法国数学家。——译者注

32. 以广义相对论为依据的空间结构

依据广义相对论可知，空间的几何结构并不是独立的，而是由物质决定的。因此，我们只有依据某种已知的物质状态进行思考，才能对宇宙的几何结构作出论断。我们由经验可知，对于一个选定的坐标系而言，每个天体的速度都比光的传播速度慢很多。因此，假如我们把物质看作是静止的，我们就能够粗略而近似地得出一个关于整个宇宙性质的结论。

从前面的讨论，我们已经知道，量杆与钟的行为受重力场的影响，也就是受物质分布的影响，这一点已经足以排除欧几里得几何在我们的宇宙中严格有效的可能性。但是可以想象，我们的宇宙与一个欧几里得宇宙的差别很微小，由于计算表明像太阳那么大的质量对于周围空间的度量（metric）的影响也是极其微小的，因此上述看法就显得越发可靠了。我们可以设想，就几何学而论，我们的宇宙与下面这个曲面相似，这个曲面的各个部分是不规则弯曲的，但整个曲面并不会与一个平面有显著的差别——就像一个有细微波纹的湖面。这样的一个宇宙可以被恰当地称为准欧几里得宇宙（quasi-Euclidean universe）。就其空间而

言，这个宇宙是无限的。但是计算表明，在一个欧几里得宇宙中，物质的平均密度必然要等于0。因此这样的宇宙不可能处处有物质存在，呈现在我们面前的将是我们在第30节中描绘的那种无法令人满意的景象。



爱因斯坦与美国无线电公司的工程师们合影。

假如我们在这样的宇宙中想要一个不等于0的物质平均密度，那么无论这个密度与0相差多么小，这个宇宙都不可能是准欧几里得的。反之，计算的结果表明：如果物质是均匀分布的，那么宇宙必然是球形的（或椭圆形的）。实际上物质的细微分布不是均匀的，因此真实的宇宙在各个部分都会与球形有出入，也就是说宇宙将是准球形的，但它必然是有限的。事实上，这个理论向我们提供了宇宙的空间广度（space-expanse）与宇宙的物质平均密度之间的简单关系。6

$$R^2 = \frac{2}{k\rho}$$

在这个方程中引用CGS（厘米-克-秒）单位制，得出 $\frac{2}{k}$ =1.08×1027；ρ是物质的平均密度，k是一个与牛顿重力常数有关的常数。

6 对于宇宙“半径”R，我们得出方程

附录一

1.洛伦兹变换的简单推导

2.闵可夫斯基四维空间（“世界”）

3.广义相对论的实验证实

4.以广义相对论为依据的空间结构

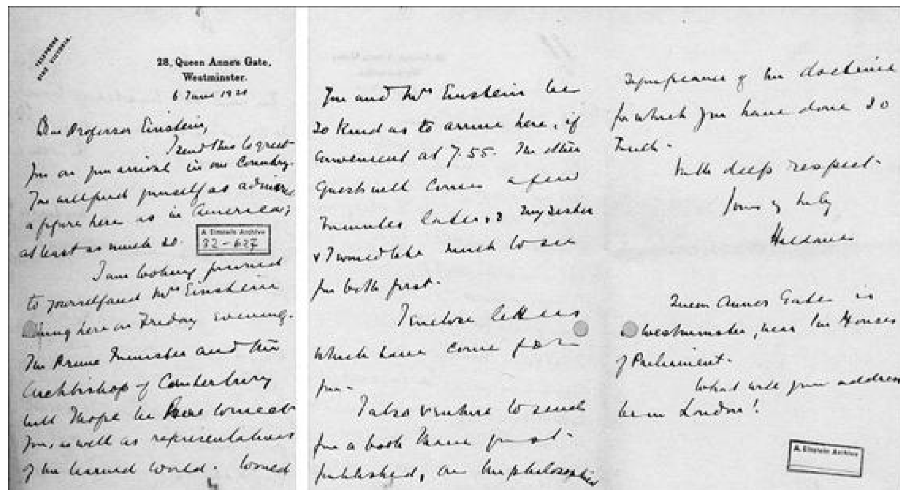
5.相对论与空间问题

……

1.洛伦兹变换的简单推导

［补充第11节］

如图2所示，两个坐标系相对取向，这两个坐标系的x轴永远相重合。在这种情况下，我们可以把问题分成几个部分。首先只考虑x轴上的事件，任何一个这样的事件，对于坐标系K都是由横坐标x和时间t来表示，而对于坐标系K'则是由横坐标x'和时间t'来表示。当给定x和t时，我们要求出x'和t'。


28, Queen Anne's Gate.
Westminster.
6 June 1921

Dear Professor Einstein,

I send this to greet you on your arrival in our Country. You will find yourself as admired a figure here as in America; at least as much so.

A. Einstein Archive
32-627

I am looking forward to yourself and Mrs Einstein dining here on Friday evening. The Prime Minister and the Archbishop of Canterbury will hope to have to meet you, as well as representatives of the learned world. Would you and Mrs Einstein be so kind as to arrive here, if convenient at 7.55. The other Guests will come a few minutes later, & my sister & I would like much to see you both first.

I enclose letters which have come for you.

I also venture to send you a book I have just published, on the philosophic significance of the doctrine for which you have done so much.

With deep respect,
Yours truly
Haldane

Queen Annes Gate is in Westminster, near the Houses of Parliament.

What will your address be in London?

A. Einstein Archive

1921年6月6日，霍尔丹子爵邀请爱因斯坦参加晚宴的信件，受邀客人都是“科学界、戏剧界、军界、政界和宗教界的名流”。

一个沿着正x轴前进的光讯号按方程式

$x=ct$

或

$x-ct=0$ （1）

传播。由于同一光讯号必须以速度c相对于K'传播，因此相对于K'的传播将由类似的公式

$x'-ct'=0$ （2）

表示。满足（1）式的那些时空点（事件）必须也满足（2）式。显然这一点是成立的，只要关系式

$(x'-ct') = \lambda(x-ct)$ （3）

在一般情况下是被满足的，式中λ表示一个常数；因为，根据（3）式，（x–ct）为0则（x'–ct'）也必为0。

假如我们对沿着负x轴传播的光线采取完全相同的思路，我们就得到了条件

$(x'+ct')=\mu(x+ct)$ （4）

将方程式（3）和（4）相加（或相减），并为方便起见引入常数a和b代换常数λ和μ，其中

$$a=\frac{\lambda+\mu}{2}$$

和

$$b=\frac{\lambda-\mu}{2}$$

我们得到方程式

$$\left.\begin{aligned} x'&=ax-bct \\ ct'&=act-bx \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

若常数a和b已知，我们就得到了问题的解。a和b可由以下讨论来确定。

对于K'的原点，我们永远有$x'=0$，因此由（5）式中的第一个方程式得到

$$x=\frac{bc}{a}t$$

假如我们将K'的原点相对于K运动的速度称为v，我们就有

$$v=\frac{bc}{a} \qquad (6)$$

同一量值v可以从（5）式得出，只要我们计算K'的另一点相对于K

的速度，或者计算K的某一点相对于K'的速度（指向负x轴）。总之，我们可以指定v为两个坐标系的相对速度。

还有，相对性原理告诉我们：由K判定的相对于K'保持静止的单位量杆的长度，必须正好等于由K'判定的相对于K保持静止的单位量杆的长度。为了看一看由K观察x'轴上的各个点是什么样子，我们只需从K对K'拍个“快照”（snapshot）；这意味着我们必须引入t（K的时间）的一个特定值，例如t＝0。对这个t值，我们从（5）式的第一个方程式就得到

$x'=ax$

因此，如果在K'坐标系中量得x'轴上的两点相隔的距离为$\Delta x'=1$，这两个点在我们的瞬时快照中相隔的距离就是

$$\Delta x=\frac{1}{a} \quad (7)$$

但假如是从K'（t'＝0）拍取快照，而且假如我们从（5）式消去t同时考虑（6）式，我们就得到

$$x'=a\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)x$$

由此我们推断：（相对于K）在x轴上相隔距离为1的两点，在我们的快照上将由距离

$$\Delta x'=a\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right) \quad (7a)$$

来表示。

但根据以上所述，这两个快照必须是全等的。因此（7）式中的Δx必须等于（7a）式中的$\Delta x'$，于是我们得到

$$a2 = \frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}} \quad (7b)$$

由方程式（6）和（7b）可决定常数a和b。将这两个常数的值代入（5）式，我们就得到了第11节中所给出的第一个和第四个方程：

$$\left.\begin{aligned} x' &= \frac{x-vt}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \\ t' &= \frac{t-\frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \end{aligned}\right\} \quad (8)$$

这样我们就得到了在x轴上的事件的洛伦兹变换。它满足条件

x'2–c2t'2＝x2–c2t2 （8a）

我们可以将上述结果推广以包括发生在x轴之外的事件，而这一推广只要保留方程式（8）并补充关系式

$$\left.\begin{aligned} y' &= y \\ z' &= z \end{aligned}\right\} \quad (9)$$

即可达成。这样，无论对于坐标系K或坐标系K’，我们都满足了任意方向上的光线在真空中的速度均为恒定这一假设。这一点可以证明如下：

设在时间t＝0时从K的原点发出一个光信号。它将按下式

$$r = \sqrt{x^2+y^2+z^2} = ct$$

传播。或者，假如我们将方程式两边进行平方，则按照下式

$x^2+y_2+z_2-c_2\ t_2=0$ （10）

传播。

光传播定律结合相对性公设要求所考虑的信号（从K'来判定）必须按照对应的公式

$r'=ct'$

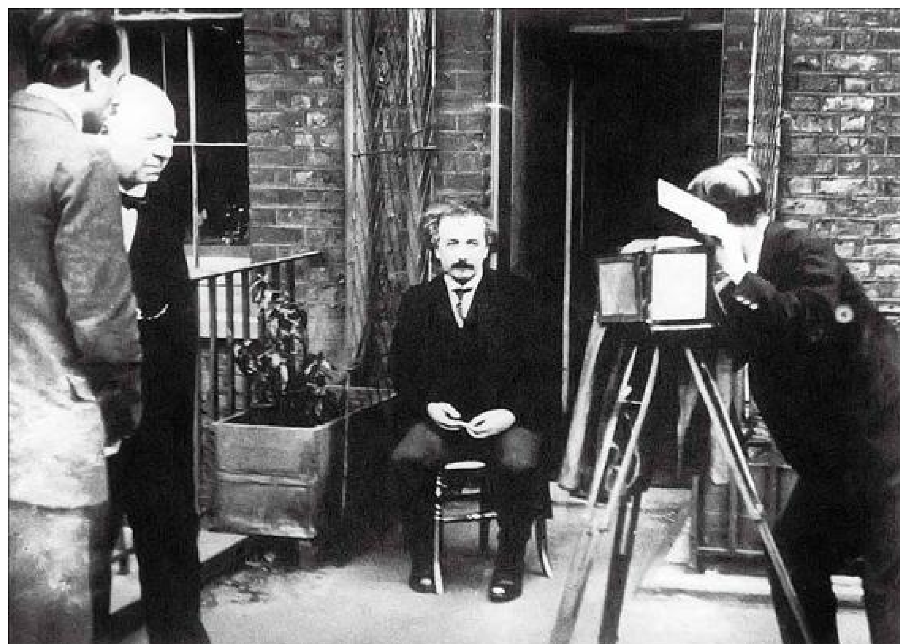
或

$x'^2+y'^2+z'^2-c^2t'^2=0$ （10a）

传播。为了可以从方程式（10）推出方程式（10a），我们必须有

$x'^2+y'^2+z'^2-c^2t'^2=\sigma(x^2+y^2+z^2-c^2t^2)$ （11）

由于方程式（8a）必须对x轴上的点成立，因此我们有$\sigma=1$。很容易看出，对于$\sigma=1$，洛伦兹变换的确满足（11）式；因为（11）式可以由（8a）和（9）式推出，因此也可以由（8）和（9）式推出。这样我们就导出了洛伦兹变换。



1921年6月11日，伦敦霍尔丹子爵的花园，爱因斯坦坐着准备让摄影师为他拍照。

由（8）和（9）式表示出的洛伦兹变换仍须加以推广。显然，在选择K'的轴时是否要使其与K的轴在空间中相互平行并不重要。同时，K'相对于K的平移速度是否沿x轴方向也没有关系。经过简单的思考可以证明：我们可以通过两种变换来建立这一广义的洛伦兹变换，这两种变换就是狭义的洛伦兹变换和纯粹的空间变换，纯粹的空间变换相当于用一个坐标轴指向其他方向的新直角坐标系取代原有的直角坐标系。

我们可以将推广的洛伦兹变换的特征以数学方式表述如下：

推广的洛伦兹变换就是以x、y、z、t的线性齐次函数（linear homogeneous function） 来表示x'、y'、z'、t'，而这类线性齐次函数的性质必须使关系式

$$x'^2+y'^2+z'^2-c^2t'^2=x^2+y^2+z^2-c^2t^2 \quad (11a)$$

能恒等满足。也就是说，假如我们用这些x、y、z、t的线性齐次函数来代换（11a）式等号左边的x'、y'、z'、t'，结果将与等号右边完全一样。

2. 闵可夫斯基四维空间（“世界”）

［补充第17节］

假如我们用虚量$\sqrt{-1}\cdot ct$代替t作为时间变量，我们就能够更简单地表述洛伦兹变换的特征。据此，假如我们引入

$x_1=x$

$x_2=y$

$x_3=z$

$$x_4 = \sqrt{-1} \cdot ct$$

对带撇号的坐标系K'也采取同样的方式，那么让洛伦兹变换恒等满足的条件可以表示为：

$$x_1'^2 + x_2'^2 + x_3'^2 + x_4'^2 = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 \quad (12)$$

也就是说，通过上述“坐标”的选用，（11a）式就变换为这个方程式。

我们从（12）式看到，虚值时间坐标x_4与空间坐标x_1、x_2、x_3是以完全相同的方式进入这个变换条件中的。正是由于这一事实，所以根据相对论，“时间”x_4应与空间坐标x_1、x_2、x_3以同等形式进入自然定律中。

闵可夫斯基将用坐标x_1、x_2、x_3、x_4描述的四维连续体称为“世界”，并且他将代表某一事件的点称为“世界点”（world-point）。这样，物理学就从三维空间中的“构造”（happening）成为四维世界中的“存在”（existence）。

Die Studentenschaft der Techn. Hochschule Dresden
(Ausschuß für geistige Interessen)

Einlaßkarte zum Vortrag
von Prof. Dr. Albert Einstein, Berlin
über «Die Relativitäts-Theorie»
Montag, den 17. Januar 1921
im großen Saale des Vereinshauses (Zinzendorfstr. 17).
Einlaß ½7 Uhr — Beginn pünktlich ½8 Uhr.

Mittelsaal	Preis	für Studierende
Reihe 1	M 9.90	4.90
	Steuer 3.30	–.90
Platz 11	13.20	5.80

Abgestempelte Karten für Studierende zum halben Preis erhalten Gültigkeit nur unter gleichzeitigem Vorzeigen der Legitimationskarte.

1921年春，爱因斯坦一次关于相对论演讲的入场券。

这个四维“世界”与（欧几里得）解析几何学的三维“空间”很近似。倘若我们在这个“空间”引入一个具有相同原点的新的笛卡尔坐标系（x_1'、x_2'、x_3'），那么x_1'、x_2'、x_3'就是x_1、x_2、x_3的线性齐次函数，并恒等地满足方程式

$$x_1'^2+x_2'^2+x_3'^2=x_1^2+x_2^2+x_3^2$$

上式与（12）式完全类似。我们可以在形式上将闵可夫斯基“世界”看作（具有虚时间坐标的）四维欧几里得空间；洛伦兹变换相当于坐标系在四维“世界”中的“转动”。

3.广义相对论的实验证实

以系统的理论观点来看，我们或许会将经验科学的演进过程想成一个连续的归纳过程。理论被发展出来，并以经验定律的形式简洁地综合概括了大量个别的观察结果，再根据这些经验定律通过类比来确定普遍定律。依照这个思路，一门科学的发展有些像编纂分类目录，这似乎是一种纯经验性的事业。

但是，上述观点绝不能概括整个实际过程，因为它忽视了直观和演绎思考在精确科学（exact science）发展中所起的重要作用。一门科学一旦走过了它的初始阶段，理论的进展就不再只是依靠排列的过程来实现。研究人员在经验数据的引导下发展出一个思想体系；一般说来，这个思想体系是由少数的基本假设——即公理，按逻辑方式建立起来的。我们将这样的思想体系称为理论。理论存在的必要理由，在于它能将大量个别观察结果联系起来，而理论的“真实性”也正在于此。

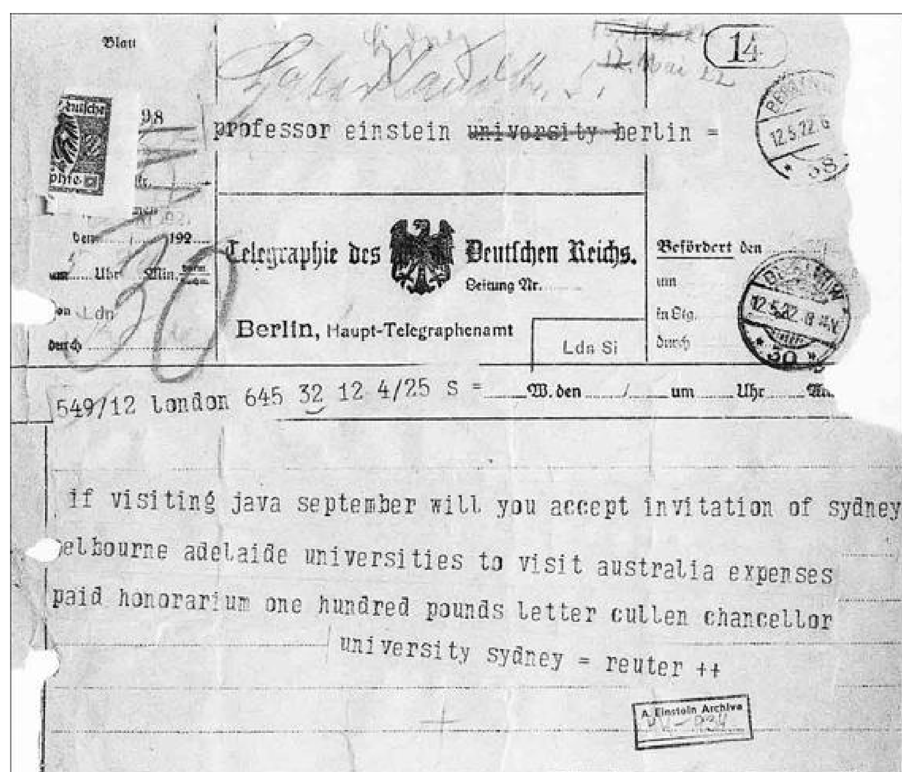
与同一组经验数据相对照可能会有好几个彼此不同的理论，但就这些能够进行检验的推论而言，这几种理论可能会非常一致，因此难以发现两种理论有任何不同的推论。例如，在生物学领域就有一个大家普遍感兴趣的例子，即一方面有达尔文关于物种通过生存竞争的选择而发展

的理论，另一方面有以后天取得的性状可以遗传的假设为基础的物种发展理论。

我们还有一个例子可以说明两种理论的推论具有一致性，这两种理论就是牛顿力学和广义相对论。这两种理论非常一致，甚至从广义相对论导出的能够进行检验的推论，正是相对论创立前的物理学没能导出的推论；尽管这两种理论的基本假设有着深刻的差别，但到目前为止我们还是可以找出几个这样的推论。下面我们将再一次讨论这几个重要的推论，并且还要讨论迄今已取得的关于这些推论的经验证据。

（1）水星近日点的运动

依据牛顿力学和牛顿的重（引）力定律，绕太阳运行的行星沿椭圆轨道环绕太阳，或者说得更正确些，环绕太阳和这颗行星的共同重心。在这一体系中，太阳或共同重心位于椭圆轨道的一个焦点上，因此在一个行星年（planet-year）中，太阳和行星之间的距离由极小增大到极大，随后又减小到极小。倘若我们在计算中不使用牛顿定律而引入一个稍微不同的重力定律，我们将发现：依据这一新定律，在行星运动的过程中，太阳和行星之间的距离仍呈现周期性变化；但在这种情况下，太阳和行星的连线在这样的一个周期中[1]所扫过的角将不再是360°。因此轨道曲线将不是一个闭合曲线，随着时间的推移，它将充满轨道平面内的一个环形部分，也就是分别以太阳和行星之间的最小距离和最大距离为半径的两个圆之间的环形部分。



Blatt

professor einstein ~~university~~ berlin =

Telegraphie des Deutschen Reichs.

Zeitung Nr.

Berlin, Haupt-Telegraphenamt

Lds Si

Befördert den

549/12 london 645 32 12 4/25 s = W. den ... um ... Uhr ... Min.

if visiting java september will you accept invitation of sydney elbourne adelaide universities to visit australia expenses paid honorarium one hundred pounds letter cullen chancellor university sydney = reuter ++

A. Einstein Archive

1922年5月12日，悉尼大学邀请爱因斯坦于1922年9月来访的电报。

依据广义相对论（广义相对论当然与牛顿的理论不同），行星在其轨道上的运动应与牛顿－开普勒（Kepler）定律有微小的出入，即从一个近日点到下一个近日点期间，太阳－行星向径（radius sun-planet）扫过的角度比完整公转一周的角度要大上如下量值

$$+\frac{24\ ^{3}a^{2}}{T^{2}c^{2}(1-e^{2})}$$

（注意：完整公转一周对应于物理学上的绝对角度量度中的2π角，上式表示的就是太阳－行星向径从一个近日点到下一个近日点期间所扫过的角度比2π大出的量值。）

在上式中，a表示椭圆的半长轴，e是椭圆的偏心率，c是光速，T是行星公转周期。我们的结果也可表述如下：依据广义相对论，椭圆的长

轴绕太阳旋转，旋转的方向与行星轨道运动的方向相同。理论要求水星的这种转动应达到每世纪43"（弧秒）。但是对我们太阳系的其他行星而言，这种转动的量值应是小到观测不出的。[2]

事实上，天文学家已经发现：用牛顿的理论计算所观测的水星运动时可能达到的精确度，无法满足现今观测所能达到的灵敏度。在计入其他行星到水星的全部扰动影响后，[3]发现仍留下一个无法解释的水星轨道近日点的移动问题，这个移动的量值与上述每世纪43"并无显著差别。这一经验结果的误差只有几弧秒。

1　从近日点（perihelion）——离太阳最近的点——再到下一个近日点的周期。

2　尤其是次近的行星——金星——的轨道几乎是一个正圆，这样就更难以精确地找出近日点的位置。（随着科技的发展，其他行星的这种效应已经被观测到了，可以参见《近代物理著名实验简介》，此书为郭奕玲等编著，山东教育出版社出版。——译者注）

3　勒威耶于1859年发现，纽科姆（Newcomb）于1895年发现。

（2）重力场对光的偏转

在第22节中已经提到，依据广义相对论，一道光线穿过重力场时，其路径会发生弯曲，这种弯曲情况类似抛射一个物体通过重力场时其路径所发生的弯曲。根据这个理论，我们应该预计一道光线经过一个天体附近时将偏向该天体。对于经过距离太阳中心Δ个太阳半径的一道光线来说，偏转角（a）应为

$$a = \frac{1.7''}{\Delta}$$

可以补充一句，依据理论，偏转的一半是由太阳的牛顿重力场造成的，而另一半则是太阳导致的空间几何形变（“曲率”）造成的。

这个结果可以在日全食时对恒星照相，从实验中进行检验。我们之所以必须等待日全食，是因为在其他时间里大气受太阳光强烈照射，以至于看不见位于太阳圆面附近的恒星。所预言的效应可从图5清楚看到。假如没有太阳（S），从地球上观测，一颗可以被视为在无限远处的恒星实际上可以在D_1方向上被观测到。但由于来自恒星的光为太阳所偏转，这颗恒星将在D_2方向上被观测到，也就是说，恒星离太阳中心的视位置比它真实的位置更远。

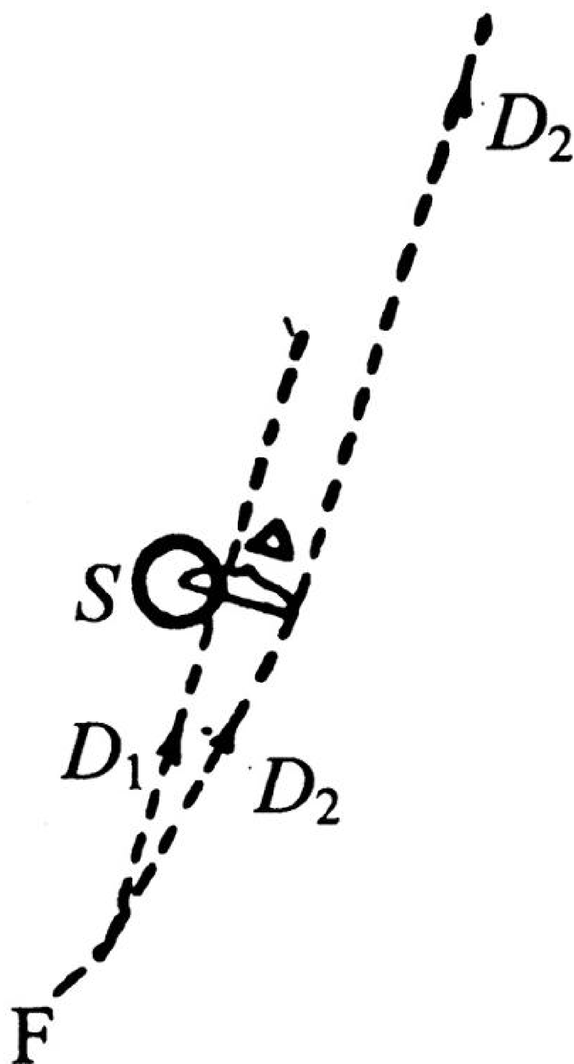


图5

实际上，这个问题可以按下列方法得到检验，在日食期间对太阳附近的恒星进行拍照。此外，当太阳位于天空的其他位置时，即在早几个月或晚几个月时，对这些恒星拍摄另一张照片。与标准照片相比，日食照片上恒星的位置应沿径向往外移（离开太阳中心），外移的量值对应于角a。



1922年，四位获得诺贝尔奖的科学家合影。

我们很感激英国皇家学会（Royal Society）和皇家天文学会（Royal Astronomical Society）对这一重要推论所进行的研究。无畏于战争及其引起的物质上和精神上的种种困难，这两个学会组建了两支远征观测队——一支赴巴西的索布拉尔（Sobral），一支赴西非的普林西比岛（Principe）；并派出了英国最著名的几位天文学家——爱丁顿、科廷厄姆（Cottingham）、克罗姆林（Crommelin）、戴维森（Davidson），以拍摄1919年5月29日的日食照片，预计在日食期间拍摄的恒星照片与其他用作比较的照片之间的相对差异只有百分之几毫米。因此，为拍摄照片所需的校准工作，以及随后对这些照片的量度都

需要很高的准确度。



1923年，爱因斯坦和法国科学家朗之万、英国科学家史密斯一起参加在柏林举行的反战示威游行。

测量的结果十分圆满地证实了这个理论。观测所得和计算所得的恒星位置偏差的直角分量（rectangular component，以弧秒为单位）如下表所列：

恒星编号	第一坐标		第二坐标	
	观测值	计算值	观测值	计算值
11	−0.19	−0.22	+0.16	+0.02
5	+0.29	+0.31	−0.46	−0.43
4	+0.11	+0.10	+0.83	+0.74
3	+0.20	+0.12	+1.00	+0.87
6	+0.10	+0.04	+0.57	+0.40
10	−0.08	+0.09	+0.35	+0.32
2	+0.95	+0.85	−0.27	−0.09

（3）光谱线的红向位移

在第23节中曾经表明：在一个相对于伽利略系K而转动的坐标系K'中，构造完全相同且被认定为相对于转动的参照系保持静止的钟，其走动的时率取决于所在的位置。我们现在要定量地研究这个依赖关系。一只钟放置于距圆盘中心r处，它相对于K的速度可由下式给出

$$v = \omega r$$

式中ω表示圆盘K'相对于K的转动角速度。设v0表示这只钟在相对于K保持静止时的单位时间内相对于K的嘀嗒次数（即这只钟的“时率”），那么当这只钟相对于K以速度v运动，但相对于圆盘保持静止时，按照第12节，这只钟的“时率”（v）将由下式给出

$$v = v0\sqrt{1- \frac{v^2}{c^2}}$$

或者以足够的精确度由下式给出

$$v = v_0\left(1 - \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right)$$

上式也可以写成如下形式

$$v = v_0\left(1 - \frac{1}{c^2}\frac{\omega^2 r^2}{2}\right)$$

若我们以Φ表示钟所在的位置和圆盘中心之间的离心力势差，也就是将单位质量从转动的圆盘上钟所在的位置移动到圆盘中心为克服离心力所需要做的功（取负值），那么我们就有

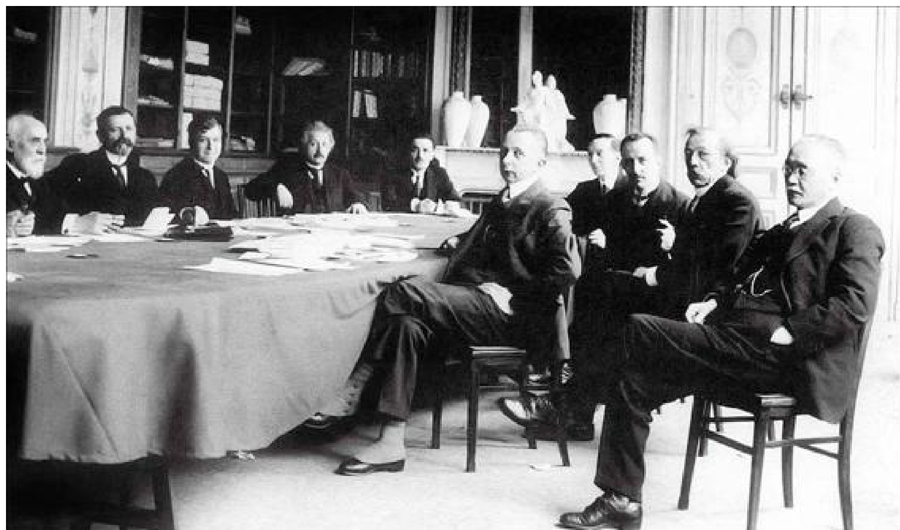
$$\Phi = -\frac{\omega^2 r^2}{2}$$

由此得到

$$v = v_0\left(1 + \frac{\Phi}{c^2}\right)$$

首先，我们由上式看到，两只构造完全相同的钟，当它们与圆盘中心的距离不一样时，它们走动的时率也不一样。由一个随着圆盘转动的观察者来看，这个结果也是成立的。

现在，从圆盘上来判定，圆盘处在一个其势为Φ的重力场中，因此我们得到的结果对于重力场在相当普遍的情况下是成立的。还有，我们可以将发出光谱线的原子视为一只钟，于是以下陈述也就得以成立。



1924年，爱因斯坦出席国际联盟国际知识合作委员会（The International Committee on Intellec-tual Cooperation）的会议。国际知识合作委员会中有两位声望很高的学者，分别是阿尔伯特·爱因斯坦和居里夫人。

一个原子吸收或发出的光的频率，取决于该原子所在位置的重力场的势。



1924年，爱因斯坦在德国的犹太学生联合会上演讲。

一个位于天体表面的原子的频率，与处于自由空间（或位于一个比较小的天体表面）同一元素的原子频率相比要低一些。这里$\Phi = -K\frac{M}{r}$，其中K为牛顿重力常数，M为天体的质量。因此在恒星表面产生的光谱线与同一元素在地球表面产生的光谱线相比应发生红向位移，位移的量值是

$$\frac{v_0 - v}{v_0} = \frac{K}{c^2}\frac{M}{r}$$

对于太阳而言，理论预测的红向位移约等于波长的百万分之二。对于恒星而言，是无法得出可靠的计算结果的，因为质量M和半径r一般都是未知的。

这种效应是否存在还是一个未知的问题，目前（1920年）天文学家正以很大的热情从事工作，以求解决这个问题。由于对太阳而言，这一效应很小，因此对其是否存在难以作出判断。波恩的格雷贝（Grebe）和巴赫姆（Bachem）根据他们自己以及埃弗谢德（Evershed）和史瓦西（Schwarzschild）对氰（cyanogen）光谱带的测量，认为这一效应的存在已经几乎没有疑问了；而其他研究人员，特别是圣约翰（St. John），则根据他们的测量结果提出了相反意见。

对恒星进行的统计研究指出，光谱线朝向折射较小一端的平均位移肯定是存在的；然而直到目前为止，根据对已有数据的检测，这些位移实际上是否是由重力效应所导致的，仍无法得出任何确定的结论。在弗伦德利希（E. Freundlich）写的一篇题为《广义相对论的验证》（Zur Prüfung der allgemeinen Relativitäts-Theorie）的论文4中，搜集了观测的结果，并从我们这里所关注问题的角度对这些结果进行了详尽的讨论。

无论如何，在未来几年将会得出一个确定的结论。倘若重力势导致的光谱线红向位移并不存在，那么广义相对论就不能成立。另一方面，假如光谱线的位移确实是重力势造成的，那么对于这一位移的研究将会为我们提供关于天体质量的重要资讯。

英文版附注：亚当斯（Adams）已于1924年通过对天狼星致密伴星的观测，明确证实了光谱线的红向位移，天狼星伴星的这一效应是太阳效应的30倍左右。

4　见柏林施普林格出版社（Julius Springer）出版的《自然科学》。

4. 以广义相对论为依据的空间结构

［补充第32节］

自从本书的第一版发行以来，我们对大尺度空间（space in the large）结构的认识（“宇宙学问题”）已有了重要的进展，即使是关于这个问题的通俗著作也是应该提及的。

我原来关于这一课题的思考基于两个假设：

（1）整个宇宙空间[5]中的物质有一个平均密度，它处处相等且不等于0。

（2）宇宙空间的大小（“半径”）与时间无关。

依据广义相对论，这两个假设已被证明是一致的，但只有在场方程式中加上一个假设项之后才能成立，但这样一个项不是理论本身所要求的，而且从理论的观点来看，这一项也不自然（“场方程式的宇宙学项”）。

我原来认为假设（2）是不可避免的，因为我当时认为，如果我们离开了这一假设，就要陷入无休止的空想中了。

但是，早在20世纪20年代，苏联数学家弗里德曼[6]就已经证明：从纯理论的观点来看，采用另一种不同的假设是自然的。弗里德曼认为，倘若决心舍弃假设（2），那么在重力场方程式中就不必引入这个不太自然的宇宙学项，而仍保留假设（1）。也就是说，原来的场方程式可

以有这样的解，其中“世界半径”与时间有关（膨胀的宇宙空间）。在这个意义上，我们可以说，依照弗里德曼的观点，这个理论要求宇宙空间具有膨胀性。

数年之后，哈勃[7]对河外星云（extra-galactic nebulae；milky ways，“银河”[8]）的专门研究证明：星云发出的光谱线存在红移（redshift），红移随着星云距离有规律地增大。就我们现有的知识而言，这种现象只能由多普勒原理解释为大尺度上恒星系的膨胀运动——按照弗里德曼的说法，这是重力场方程式所要求的。因此，在某种程度上可以认为，哈勃的发现是这一理论的一种证明。

但是这里确实引出了一个不可思议的困难局面。假如将哈勃发现的银河光谱线位移解释为一种膨胀（从理论观点来看这并没有什么疑问），那么据推断，这种膨胀“仅仅”起源于大约10亿年前；但依据天体力学（physical astronomy，重力天文学），个别恒星和恒星系的演化很可能需要长得多的时间。目前我们对如何克服这一矛盾仍毫无所知。[9]

294 THE NEW PALESTINE March 27, 1925

The Mission of Our University

By ALBERT EINSTEIN

HE opening of our Hebrew University on Mount Scopus, at Jerusalem, is an event which should not only fill us with just pride, but should also inspire us to serious reflection.

A University is a place where the universality of the human spirit manifests itself. Science and investigation recognize as their aim the truth only. It is natural, therefore, that institutions which serve the interests of science should be a factor making for the union of nations and men. Unfortunately, the universities of Europe today are for the most part the nurseries of chauvinism and of a blind intolerance of all things foreign to the particular nation or race, of all things bearing the stamp of a different individuality. Under this regime the Jews are the principal sufferers, not only because they are thwarted in their desire for free participation and in their striving for education, but also because most Jews find themselves particularly cramped in this spirit of narrow nationalism. On this occasion of the birth of our University, I should like to express the hope that our University will always be free from this evil, that teachers and students will always preserve the consciousness that they serve their people best when they maintain its union with humanity and with the highest human values.

Jewish nationalism is today a necessity because only through a consolidation of our national life can we eliminate those conflicts from which the Jews suffer today. May the time soon come when this nationalism will have become so thoroughly a matter of course that it will no longer be necessary for us to give it special emphasis. Our affiliation with our past and with the present-day achievements of our people inspires us with assurance and pride *vis-à-vis* the entire world. But our educational institutions in particular must regard it as one of their noblest tasks to keep our people free from nationalistic obscurantism and aggressive intolerance.

Our University is still a modest undertaking. It is quite the correct policy to begin with a number of research institutes, and the University will develop naturally and organically. I am convinced that this development will make rapid progress and that in the course of time this institution will demonstrate with the greatest clearness the achievements of which the Jewish spirit is capable.

A special task devolves upon the University in the spiritual direction and education of the laboring sections of our people in the land. In Palestine it is not our aim to create another people of city dwellers leading the same life as in the European cities and possessing the European bourgeois standards and conceptions. We aim at creating a people of workers, at creating the Jewish village in the first place, and we desire that the treasures of culture should be accessible to our laboring class, especially since, as we know, Jews, in all circumstances, place education above all things. In this connection it devolves upon the University to create something unique in order to serve the specific needs of the forms of life developed by our people in Palestine.

All of us desire to cooperate in order that the University may accomplish its mission. May the realization of the significance of this cause penetrate among the large masses of Jewry. Then our University will develop speedily into a great spiritual center which will evoke the respect of cultured mankind the world over.

1925年3月27日，耶路撒冷希伯来大学创立之际，爱因斯坦发表了这篇文章，他明确地指出了科学工作的普遍性原则，并警告注意狭隘的民族主义。

我还需要提一下，我们还无法通过宇宙空间膨胀理论以及天文学的经验数据得出关于（三维）宇宙空间的有限性或无限性的结论；而原来的宇宙空间“静态”假设，则可导出宇宙空间的闭合性（有限性）。

5　此处英文原作space，但依据上下文，应译成“宇宙空间”为宜。

以下不再说明。——译者注

6 亚历山大·弗里德曼（A. A. Friedman）：1888—1925年，苏联数学家和地球物理学家，1922—1924年提出第一批相对论不稳定宇宙模型。——译者注

7 埃德温·鲍威尔·哈勃（Edwin Powell Hubble）：1889—1953年，美国天文学家，星系天文学的奠基人，观测宇宙学的开创者之一。——译者注

8 依据现今天文学标准用法应被称为“星系”（galaxies）。——译者注

9 这是本书初版时的情况，最新的数据认为宇宙约起源于120亿至150亿年前。——译者注

5.相对论与空间问题

牛顿物理学的特点是承认空间和时间都和物质一样有其独立而实际的存在，这是因为在牛顿的运动定律中出现了加速度的概念。但是在这一理论中，加速度只可能指“相对于空间的加速度”。因此，为了使牛顿运动定律中出现的加速度能够被看作是一个有意义的量，就必须将牛顿的空间看作是“静止的”，或至少是“非加速的”。对于时间而言，情况完全相同，时间当然也与加速度的概念有关。牛顿本人以及他同时代最具批判性的人都认为，给空间本身和空间的运动状态赋予同样的物理实在性并不是很妥当；但是，为了使力学具有明确的意义，在当时并无他法。

要人们赋予一般的空间尤其是一无所有的空间以物理实在性，的确是一种严苛的要求。自远古以来，哲学家就一再拒绝这样的假设。笛卡尔曾大体按照下列方式进行验证：空间与广延性是等同的，但广延性是与物体相联系的。因此没有物体的空间是不存在的，也就是说并不存在一无所有的空间。这一论辩的弱点主要是这样的：广延性概念起源于我

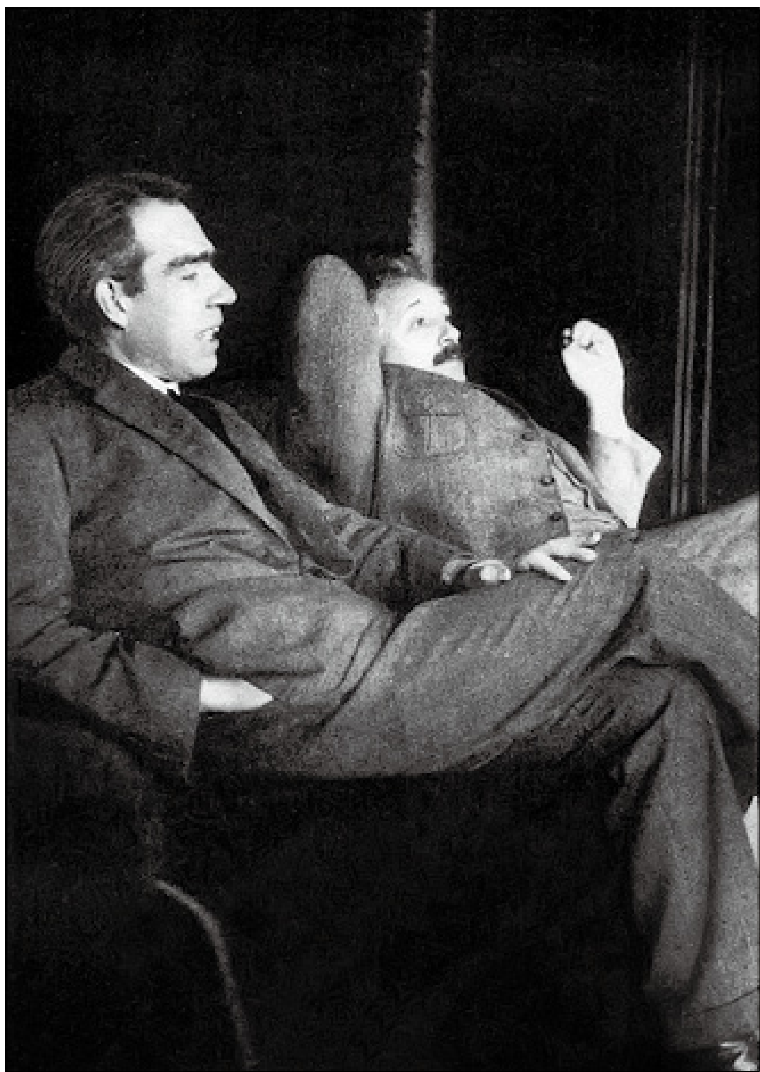
们能将固体铺展开来或并拢在一起的经验，这一点当然是正确的，但不能由此得出结论，假如某些事例本身并不是构成广延性概念的原因，那么这一概念就不能通用于这些事例。以这种方式来推论概念是否合理，可以间接地由它在理解经验的结果上所具有的价值来证明。因此，关于广延性这一概念仅适用于物体这一断言，就其本身而论肯定是没有根据的。不过，我们在后文将会看到，广义相对论在绕了一个大弯后，仍旧证实了笛卡尔的概念。使笛卡尔得出他十分吸引人的见解的一定是这种感觉，即只要不是不得已的情况，我们不应该对空间这样无法“直接体验”10的东西赋予实在性。



1925年，爱因斯坦要解释量子力学的矛盾，在与尼尔斯·玻尔的论战中一直保持进攻姿态。图中是爱因斯坦与玻尔讨论，玻尔苦苦思索，爱因斯坦却很轻松。

以我们通常的思考习惯为基础来思考，空间观念或这种观念的必要性的心理起源，远非表面看起来那样明显。古代的几何学家所研究的是概念上的东西（直线、点、面），却没有真正研究空间本身，像后来在解析几何学上所做到的那样。但是，空间观念仍可以从某些原始经验中得到一些启示。假设有一个已经制造好的箱子，我们可以按某种方法把物体排列在箱子内，将它装满。这种排列物体的可能性是“箱子”这一物

质客体的属性，是随着箱子而产生的，即随着被箱子“包围的空间”而产生的。这个“被包围的空间”因箱子的不同而异，人们就会很自然地认为这个“被包围的空间”在任何时刻都与箱子内是否真有物体存在无关。当箱子内没有物体时，箱子的空间看起来似乎是“一无所有的”。



爱因斯坦与玻尔之间的论战持续多年，当时几乎所有理论物理学家都参与其中，但直到今天仍然没有结论。

到目前为止，我们的空间概念是与箱子联系在一起的。但是我们知道，使箱子具有容纳物体可能性的并非取决于箱壁的厚薄。能否将箱壁

的厚度缩减至0并使这一“空间”不致因此消失呢？显然，这种求极限的方法是很自然的，这样在我们的思想中就只剩下没有箱子的空间，一个本身自然存在的空间；假如我们忘记这一概念的起源，这个空间似乎是很不实在的。人们能够了解，将空间看作与物质客体无关且可以脱离物质而存在的东西，这是与笛卡尔的论点相反的。11（但这并没有妨碍他在解析几何学中，将空间当作一个基本概念来处理。）当人们指出水银气压计中存在真空时，肯定就完全驳倒了所有抱持笛卡尔见解的人。但是不可否认，甚至在初始阶段，空间这一概念或者空间被看作是独立而实在的东西，也带有一些令人难以满意的地方。

将物体装入空间（例如箱子）是三维欧几里得几何学的课题，其公理体系很容易让人迷惑，使我们忘记它所讨论的是可以实现的情况。

假如空间概念是按上述方式形成的，并且是从“填满”箱子的经验推论来的，那么这个空间从本质上说就是一个有界的空间。然而，这种限制看来并不是必要的，因为我们总是可以在一个比较大的箱子中装入那个比较小的箱子。这样看来空间又好像是无界的。

我在此不准备讨论关于三维性质和欧几里得性质的空间概念如何能溯源到较为原始的经验。我倒是想首先从其他角度来讨论一下，空间概念在物理学思想发展过程中所起的作用。

当一个小箱子s在一个大箱子S的全空空间（hollow space）中处于相对静止的状态时，s的全空空间就是S的全空空间的一部分，并且将s和S的全空空间一起包括进去的同一个“空间”，既属于箱子s也属于箱子S。但是，当s相对于S运动时，这个概念就没那么简单了。人们倾向于认为s总是包围着同一个空间，但它所包围的S的一部分空间则是可变的。因而有必要认定每一个箱子都有其特别而无界的空间，并且有必要假设这两个空间彼此正在进行相对运动。

在人们注意到这一复杂情况之前，空间看起来好像是物体在其中游来游去的一种无界的介质或容器。但是现在必须记得，空间有无限多个，这些空间在彼此进行相对运动。认为空间是客观存在，且不依赖于物质这一概念，属于近代科学兴起之前的思想，但是存在着无限多个彼

此进行相对运动的空间这一观念却不是。后一种观念在逻辑上确实是不可避免的，但是这种观念即使在现代12科学思想中也远未起过重要的作用。

关于时间概念的心理起源又是怎样的呢？这一概念无疑是与“回想”（calling to mind） 的事实相联系的，并且也与感觉经验和对这些经验的回忆（recollection）这两者之间的区别相联系。感觉经验与回忆（或简单重现，simple re-presentation）之间的区别，是否可以在心理上让我们直接感受到呢？这一点就其本身而言是有疑问的。每个人都有过这样的经历，就是曾怀疑某件事是通过自己的感官真正经历过的呢，还是只不过是一场梦。区别这两种可能性的能力，大概最初是心智（mind）要整理出次序的一种活动的结果。

一个经验是与一件回忆相联系的，并且它与“此刻的经验”（present experience）相比是“较早的”。这是一种用于回忆经验的排列概念次序的原则，而贯彻这一原则的可能性就产生了主观的时间概念，也就是基于个人经验排列的时间观念。

我们说使时间概念具有客观意义是什么意思呢？我们来举—个例子。甲（“我”）有这样的经验：“天空正在闪电”。与此同时，甲还体验到乙的这样一种行为，甲可以将这种行为与他本身关于“天空正在闪电”的经验联系起来。这种甲把“天空正在闪电”的经验与乙联系起来，对于甲来说，他会认为其他人也参与了“天空正在闪电”的经验。“天空正在闪电”就不再被解释为一种个人独有的经验，而是被解释为其他人的经验（或者最终被仅仅解释为是一种“潜在的经验，potential experience”）。这样就产生了以下解释：“天空正在闪电”本来是进入意识中的一个“经验”，但现在也可以解释为一个（客观的）“事件”了。当我们谈到“实在的外部世界”（real external world）时，所指的就是所有事件的综合。

1926年1月29日，罗曼·罗兰60岁生日之际发表的爱因斯坦写给《书友》（Liber Amicorum）的稿件的草稿。爱因斯坦与罗曼·罗兰都致力于和平事业。

我们已经看到，我们必须为我们的经验规定一种时间排列，大体如下所述。若β晚于α，而γ又晚于β，则γ也晚于α（经验的序列）。对于我们已经与经验联系起来的“事件”而言，这方面的情况又是怎样的呢？乍看之下似乎可以假设事件的时间排列是存在的，而这种排列与经验的时间排列是一致的。一般来说，人们会不自觉地做出上述假设，直到产生怀疑为止。[13]为了获得客观世界的概念，还需要另一个辅助概念：事件在时间上和空间上都是有局限性的（localized）。

在前几段中，我们曾试图描述空间、时间和事件各概念在心理上是如何与经验联系起来的。从逻辑上来说，这些概念是人类智力的自由创造物，是思考的工具，这些概念能将个别经验相互联系起来，以便能更好地探究这些经验。要认识这些基本概念的经验来源，就应该弄清楚我们实际上在多大范围内受这些概念的约束。这样，我们就可以认清我们具有的自由，想在必要的时候合理地利用这种自由总是有些困难的。

在此关于空间—时间—事件各概念[14]的心理起源方面，我们还要进行一些必要的补充。我们曾经利用箱子以及在箱子内排列物品的例子，

将空间概念与经验联系起来，因此这一概念的形成已经在以物质客体（例如“箱子”）的概念为前提了。同样，对于客观的时间概念的形成，人也起着物质客体的作用。所以，依我看来，物质客体这一概念的形成，必须先于我们的时空概念。

所有这些类空概念，与心理学领域的痛苦、目标和目的等概念一样，同属于（近代）科学兴起以前的思想。目前物理思想的特点，与整个自然科学思想的特点一样，都是在原则上力求完全用“类空”概念来说明问题，尽量借助于这些概念来表述一切具有定律形式的关系。物理学家设法把颜色和音调归于振动，生理学家设法把思想和痛苦归于神经作用；这样就从事物存在的因果关系中消除了心理因素，从而使心理因素在任何情况下都不构成因果关系中的一个独立环节。现在的“唯物主义”（materialism）一词正是指这种观点，即认为完全用“类空”概念来理解一切关系，在原则上是可能的（因为“物质”已失去了作为基本概念的作用）。

H. FREUND
MINISTERIALDIREKTOR Z. D.
DRESDEN-N. 6
MARTIN LUTHER-PLATZ 11
TELEFON 27947

DRESDEN, DEN 17.Jan.27.

Sehr geehrter Gesinnungsfreund!

Auf Grund einer Aussprache mit Herrn TUCHOLSKY beabsichtige ich entsprechend den Reihen: Köpfe ... Wirtschaftsführer ... eine Reihe ... Politikeranalysen - Titel steht noch nicht fest - in der Weltbühne zu veröffentlichen. Das wird zunächst nur mit Gesinnungsfreunden möglich sein. Deshalb wende ich mich mit der Anfrage an Sie, ob Sie zu einer Analyse bereit wären. Sie fände auf individualpsychologischer Grundlage also unter Nichtbetonung der Sexualität statt. Es würde kein Wort ohne vorherige Genehmigung veröffentlicht und für jede nicht zu veröffent = lichende Mitteilung bestünde Schweigepflicht.

Meine Legitimation zu solcher Arbeit entnehme ich folgenden Umständen.

1) objektiv bedeutet eine derartige Analysenreihe eine die Politik und Journalistik, wie die Psychologie verfeinernde und befruchtende Unternehmung mit rückwirkender anregender Kraft für den Analysierten.
2) Mit der gleichzeitigen Eignung als Politiker und Psychotherapeut ist in meiner Person eine nicht häufige Voraussetzung für solche Analyse gegeben.

Ich bitte Sie, mir Ihre Meinung zu der Sache mitzuteilen. Im übrigen wird anlässlich eines Berliner Aufenthaltes am 22. und 24.d.M. auch eine Aussprache möglich sein. Am22. am besten in der Zeit von 12 - 4. Am 24. in der Zeit von 9 - 12.

Mit Gesinnungsgruss!

Ihr sehr ergebener

H. Freund

S. g. H.

Ich bedaure, Ihrem Wunsche nicht entsprechen zu können, weil ich gerne im Dunkel des Nicht-Analysiertseins verbleiben möchte.

Hoch.

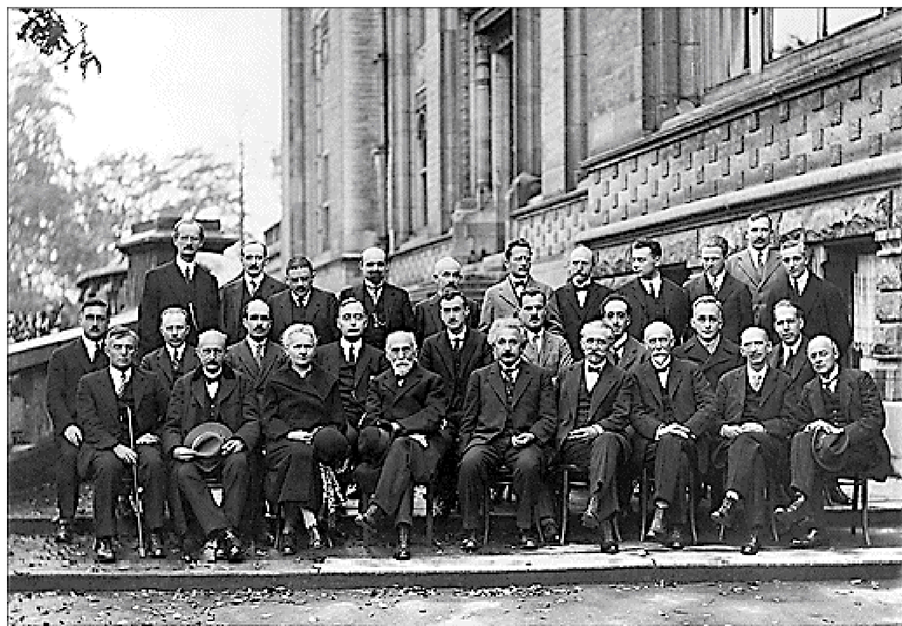
A. E.

1927年1月17日，爱因斯坦直接在弗洛伊德的来信上拟出回信。

为何必须将自然科学思想中的基本观念，从奥林匹斯天界15拖下来，并设法把它们的世俗血统揭发出来呢？为了使这些观念从附着其上的禁忌中解脱出来，从而能够在构成观念或概念方面获得更大的自由。休谟16和马赫首先提出了这一批判性想法，他们在这一方面具有不朽的功劳。

科学从科学发展前的思想中，接收了空间、时间和物质客体（其中重要的特例是“固体”）等概念，并加以修正使其更为确切。在这方面第

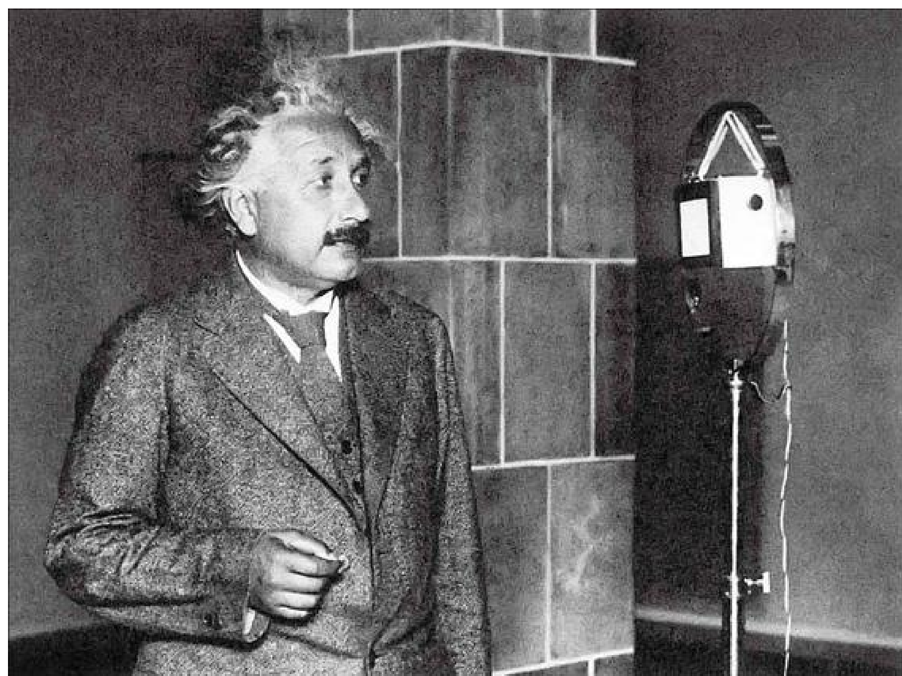
一个重要的成就是欧几里得几何学的发展，我们绝不能只看到欧几里得几何学的公理体系，而忽略它的经验起源（将固体铺展开来或并列在一起的可能性）。具体来说，空间的三维性和其欧几里得特性都起源于经验（空间可以用结构相同的“正方体”完全充满）。



1927年第五届索尔维会议合影。由于这次会议中爱因斯坦与玻尔的大辩论，这次索尔维峰会也被冠以“最著名”的称号。

由于发现了不存在完全刚性的物体，使得空间概念变得更加微妙，一切物体都可以发生弹性形变，且随温度的变化而改变其体积。因此，几何结构（其全等的可能性由欧几里得几何学来描述）的表示就无法脱离物理概念。但由于物理学毕竟还需要借助几何学才能建立一些概念，因此几何学的经验性内容只能就整个物理学的架构来陈述和检验。

关于空间概念还不能忘却原子论（atomistics）及其对物质的有限可分割性（finite divisibility）的概念，因为比原子还小的空间是无法量度的。原子论还迫使我们在原则上放弃可以清楚地和静止地划定固体界面这一观念。严格来说，甚至在宏观领域中，对于相互接触的固体的可能位形（configuration）而言，也不存在精确的定律。



1929年10月21日，在纪念电灯发明50周年的宴会上，爱因斯坦通过短波向爱迪生表示祝贺。

尽管如此，还是没人想放弃空间概念，因为在自然科学最圆满的完整体系中，空间概念看起来是不可或缺的。在19世纪，唯有马赫曾经认真思考过舍弃空间概念，而用所有质点之间的瞬时距离（instantaneous distance）的总和这一概念来取代它。（如此尝试是为了试图得到对惯性的满意理解。）

10　对于这一用语的理解需加小心。

11　康德曾试图否认空间的客观性来消除这一困难，但这种做法难以让人认真看待。箱子内的空间可以装东西，这种固有的可能性是客观存在的，正如箱子本身以及能放进箱子内的物体是客观存在的一样。

12　“现代”一词为翻译时所加。——译者注

13　例如，通过声音获得的经验的时间次序可以不与通过视觉获得

的时间次序一致，因此我们不能把事件的时间次序与经验的时间次序简单地等同起来。

14　我们将把这些概念更简短地称为“类空”（space-like）概念，以区别于心理学上的概念。

15　希腊神话中传说奥林匹斯山（Mount Olympus）是远古时代希腊众神所居之地，此处的奥林匹斯天界（Olympian fields）指雄伟的架构。——译者注

16　戴维·休谟（David Hume）：1711—1776年，英国哲学家、历史学家和政治家。——译者注

（1）场

在牛顿力学中，空间和时间起着双重作用。第一，空间和时间起着物理学上所发生事件的载体（carrier）或框架（frame）的作用；相对于载体或框架，事件是由其空间坐标和时间来描述的。原则上，物质被看作是由“质点”构成的，质点的运动构成物理事件。倘若我们将物质看成是连续的，我们只能在人们不愿意或不能描述物质的分立结构的情况下，暂时作这样的假设。在这种情况下，物质的微小部分（体积元）同样可以被当成质点来处理；至少我们可以在只考虑运动而不考虑此刻不可能或者没有必要归于运动的那些事件（例如温度变化、化学过程等）的范围内照这样来处理。空间和时间的第二个作用是当作一种“惯性系”（inertial system）。在想得出的所有参考系中，惯性系被认为具有这样的好处，即惯性定律对于惯性系是有效的。

这里的主要观点是：人们曾设想，不依赖主观认识的“物理实在”（至少在原则上）是由作为一方的空间和时间，以及作为另一方的与空间和时间做相对运动的永远存在的质点所构成的。这个关于空间和时间独立存在的观点，可以用下述的极端说法来表达：假如物质消失了，空间和时间本身（作为物理事件的一个舞台）依然存在。

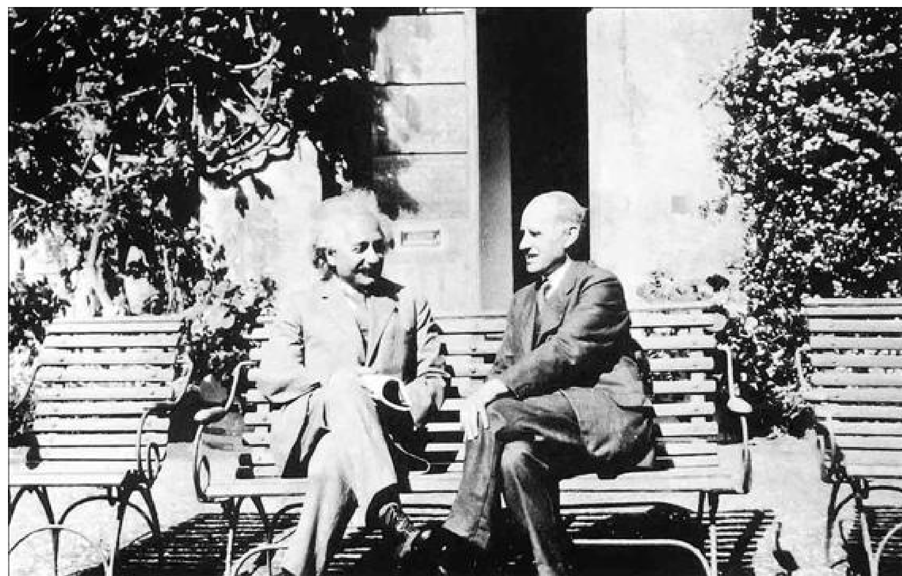
理论的发展打破了上述观点。发展最初似乎与时空问题毫不相干，只是出现了场的概念以及最后在原则上要用这一概念来取代粒子（质点）观念的趋势。在经典物理学的架构中，场的概念是在物质被看成连续体的情况下作为一个辅助性概念而出现的。例如，在考虑固体的热传导时，物体的状态是由物体的每一个点在每一个确定时刻的温度来描述的。在数学上，这就意味着将温度T表示为温度场，即表示为空间坐标和时间t的一个数学表示式（或函数）。热传导定律被表述为一种局域的关系（微分方程式），其中包含热传导的所有特殊情况。在这里，温度就是场概念的一个简单例子，这是一个量（或量的复合体），是坐标和时间的函数。另一个例子就是对液体运动的描述，在每一个点上于每一个时刻都有一个速度，这个值由速度到某一坐标系的轴的三个“分量”来描述（矢量）。在这里，在每一个点的速度的各分量（场分量）也是坐标（x、y、z）和时间（t）的函数。

前面提到的场的特性是它们只存在于有质物质（ponderable mass）中，仅仅用来描述这种物质的状态。按照场概念的历史发展来看，没有物质的地方就不可能有场的存在。但是，在19世纪的前25年中，人们证明：假如将光视为一种波动场——与弹性固体中的机械振动场完全相似，那么光的干涉和运动现象就能够解释清楚了。因此，人们感到有必要引进一种在没有有质物质的情况下，也能存在于“一无所有的空间”中的场。

这种情况造成了一个自相矛盾的局面，因为按其起源，场概念似乎只限于描述有质体（ponderable body）内部的状态。由于人们确信每一种场都应被看成是可给予力学解释的一种状态，而这又以物质的存在为前提，因此场概念只限于描述有质体内部的状态这一点就显得更加确切了。因此人们不得不假设，在一向被认为是一无所有的空间中也处处存在某种物质，这种物质被称为“以太”。

将场概念从场必须有一个机械载体与之相联系的假设中解放出来，这是物理思想发展中在心理方面最令人感兴趣的事件之一。19世纪下半叶，从法拉第和麦克斯韦的研究中可以更加清楚地看到，用场描述电磁过程远胜于以质点的力学概念为基础的处理方法。由于在电动力学中引进了场的概念，麦克斯韦成功地预言了电磁波的存在，因为电磁波和光

波具有相等的传播速度，所以它们在本质上的同一性也就无可置疑了，因此光学从原则上就成了电动力学的一部分。这一巨大成就的心理效果是：与经典物理学的机械论体系（mechanical framework）相对立的场概念逐渐赢得了更大的独立性。



1930年6月，爱因斯坦与天文学家阿瑟·爱丁顿在剑桥大学的合影。

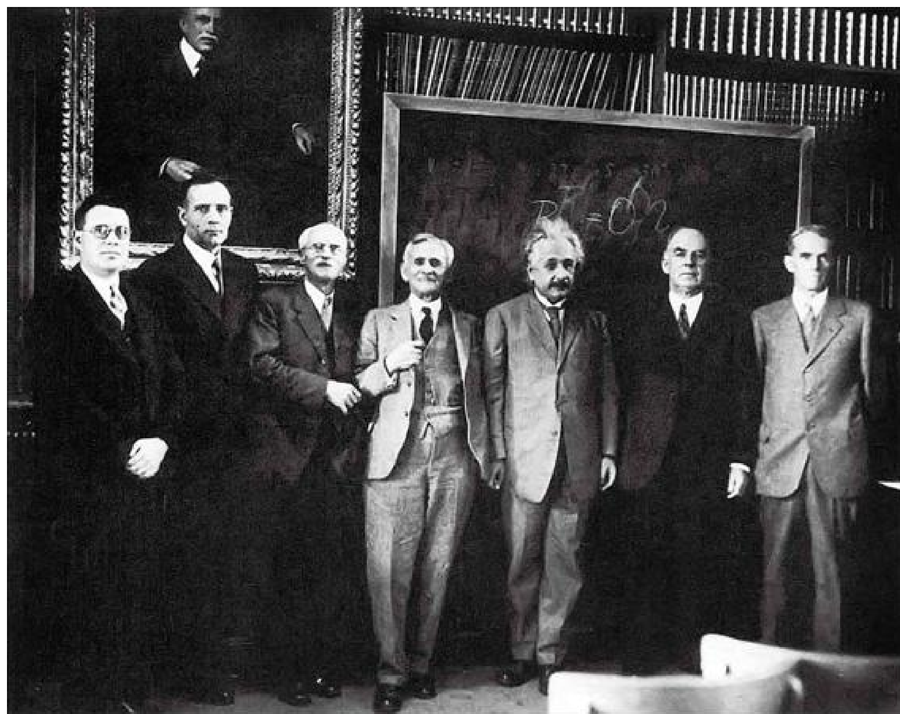
但是最初人们还是理所当然地认为必须将电磁场解释为以太的状态，并且设法将这种状态解释为机械性状态。但由于这些努力总是遭遇挫折，科学界才逐渐放弃这种机械解释的主张。然而，在19世纪和20世纪之交时，人们仍然确信电磁场是以太的状态。

以太学说带来了下列问题：相对于有质体而言，以太的行为从力学观点来看是怎样的呢？是以太参与物体的运动，还是以太的各个部分彼此保持相对静止状态呢？为解决这一问题，人们曾做过许多精巧的实验。这里应提到下列两个重要事实：由于地球周年运动而产生的恒星"光行差"（aberration）和"多普勒效应"，即恒星的相对运动对其发射到地球上的光的频率（已知的发射频率）的影响。对于所有这些事实及实验的结果，除了迈克尔逊－莫雷实验外，洛伦兹也根据下列假设做出了解释：以太不参与有质体的运动，并且以太的各部分之间没有相对运动。这样以太看起来好像体现着一个绝对静止的空间。然而，洛伦兹的研究

获得了更多成就。洛伦兹根据下列假设解释了当时所知道的发生在有质体内部的所有电磁和光学过程，有质物质对于电场的影响（以及相反情况）完全是由于物质的组成粒子带有电荷，而这些电荷也参与了粒子的运动。洛伦兹证明了迈克尔逊 - 莫雷实验得出的结果至少与以太处于静止状态的学说并不矛盾。

尽管有了这些辉煌的成就，以太学说仍然无法令人完全满意。经典力学无可怀疑，经典力学在很高的近似程度上是成立的，它告诉我们一切惯性系或惯性“空间”对于自然定律的表达都是等效的，即从一个惯性系过渡到另一个惯性系，自然定律是不变的。电磁学和光学实验也以相当高的准确度告诉我们同样的事实。但是电磁理论基础却告诉我们，必须优先选取一个特别的惯性系，即静止的光以太（luminiferous ether）。电磁理论基础的这一观点实在无法令人满意。难道就没有如经典力学那样支持惯性系的等效性（狭义相对性原理）的修正理论吗？

答案就是狭义相对论。狭义相对论从麦克斯韦 - 洛伦兹理论中接受了光速在真空中保持恒定这一假设。为了使这一假设与惯性系的等效性（狭义相对性原理）相一致，必须放弃“同时性”具有绝对性质的观念。此外，对于从一个惯性系过渡到另一个惯性系，必须引用时间和空间坐标的洛伦兹变换。狭义相对论的全部内容包含在下列公设中：自然界的定律对于洛伦兹变换是不变的。这个要求的重要实质在于，它以一种明确的方式限定了可能的自然定律。



1931年，爱因斯坦（右三）访问威尔逊山天文台时与天文学家勒梅特（左一）、哈勃（左二）、迈克尔逊（左四）等的合影。

狭义相对论对于空间问题的观点是怎样的呢？首先，我们需要注意不要以为实在世界的四维性（four-dimensionality of reality）是狭义相对论第一次提出的新看法。甚至早在经典力学中，事件就是由四个数来确定的，即三个空间坐标和一个时间坐标；因此，全部物理“事件”被认为是存在于一个四维连续流形（manifold）之中。但是根据经典力学，这个四维连续体可以被客观地分割为一维的时间和三维的空间两部分，且只有三维空间存在同时的事件。一切惯性系都进行了相同的分割，两个确定的事件相对于一个惯性系的同时性，也就意味着这两个事件相对于一切惯性系的同时性。我们说经典力学的时间是绝对的就是这个意思。狭义相对论的看法则与此不同。所有与一个选定的事件同时的事件，就一个特定的惯性系而言确实是存在的，但这不再能说成为与惯性系的选择无关的了。于是四维连续体不再能被客观地分割成两个部分，而是整个连续体包含了所有同时事件；所以“此刻”（now）对具有空间广延性的世界就失去了它的客观意义。由于这一点，倘若想要表示客观

关系的意义，而不带非必要的惯常的任意性的话，那么空间和时间必须被看成是客观上不可分割的四维连续体。

狭义相对论揭示了一切惯性系在物理上的等效性，也就证明了静止的以太这一假设是不能成立的，因此必须放弃将电磁场视为物质载体的一种状态这个观点。于是“场”就成为物理描述中无法再简化的（irreducible）基本要素，正如在牛顿的理论中，物质概念无法再简化一样。

到目前为止，我们一直将注意力放在探讨狭义相对论在哪一方面修改了空间和时间的概念，现在我们将注意力集中到狭义相对论从经典力学中吸取的那些要素上。在狭义相对论中，自然定律只在引用惯性系作为时空描述的基础时才是有效的，而惯性原理和光速恒定原理只有对一个惯性系才是有效的，场定律（field-law）也只有对惯性系才是有意义和有效的。因此，如同在经典力学中那样，在狭义相对论中，空间也是表述物理实在的一个独立部分。假如我们设想将物质和场移走，那么惯性空间（或者更确切地说是这个空间与联系在一起的时间）依然存在。这个四维结构（闵可夫斯基空间）被认为是物质和场的载体。各惯性空间与联系在一起的时间，只是由惯性洛伦兹变换联结起来的一种特选的四维坐标系。由于在这个四维结构中不再存有客观地表示“此刻”的任意一个部分，关于事物发生（happening）和生成（becoming）的概念并非完全无用，而是更加复杂化了。因此，将物理实在视为一个四维存在物，而不是像直到目前为止那样将它视为一个三维存在物的演化（evolution），似乎更自然些。

狭义相对论的刚性四维空间在某种程度上类似于洛伦兹的刚性三维以太，只不过它是四维的。对于狭义相对论，以下陈述也是成立的：物理状态的描述假设了空间是原来就已经给定的，并且是独立存在的。因此，连狭义相对论也没有消除笛卡尔对“空虚空间”是独立存在的或者确实是先验性存在的这一见解所表示的怀疑。在这里进行初步讨论的真正目的，就是要说明广义相对论在多大程度上解决了这些疑问。

（2）广义相对论的空间概念

广义相对论的起因主要是力图去了解惯性质量和重力质量的同等性。让我们从一个惯性系S_1谈起，这个惯性系的空间以物理的观点来看是空虚的。换句话说，在所考虑的这部分空间中，既没有物质（就通常意义而言）也没有场（就狭义相对论的意义而言）。假设有另一个参照系S_2相对于S_1做匀加速运动，这样S_2就不是一个惯性系。对于S_2来说，每一个实验物体的运动都具有一个加速度，这个加速度与实验物体的物理性质和化学性质无关。因而相对于S_2，至少就第一阶近似而言，存在着一种与重力场无法区分的状态。因此下列概念也与可观察的事实相符：S_2也相当于一个“惯性系”；不过相对于S_2还存在一个（均匀的）重力场（这里不必管这个重力场的起源）。因此，当考虑的体系中包含重力场时，假设这个“等效原则”（principle of equivalence）可以推广到参照系的任何相对运动，那么惯性系就失去了客观的意义。假如在这些基本观念的基础上，能够建立起一个无矛盾的理论，那么这一理论本身将满足惯性质量与重力质量相等的事实，而这个事实也已经为经验充分证实了。

以四维的观点来思考，四个坐标的一种非线性变换对应了从S_1到S_2的过渡。这里产生了一个问题：哪一种非线性变换是可能的，或者说，洛伦兹变换是怎样推广的？下列思考可以帮助我们回答这个问题。

我们假设早先理论中的惯性系具有这个性质：坐标差由固定不移的“刚性”量杆测量，时间差由静止的钟测量。对第一个假设还需要补充另一个假设，即对于静止量杆的展开和拼接而言，欧几里得几何学关于“长度”的定理都是成立的。这样，经过初步的思考，就可以从狭义相对论的结果得出下列结论：对相对于惯性系（S_1）做加速运动的参照系（S_2）而言，不再可能对坐标做这种直接的物理解释。但假如情形是这样的话，坐标现在就只能表示“邻接”（contiguity）的级（order）或秩（rank），也就是只能表示空间的维级（dimensional grade），但并不能表示空间的度量性质（metrical property）。因而就促使我们将变换推广到任意的连续变换。[17]这就意味着含有广义相对性原理：“自然定律对于任意连续的坐标变换必须是协变的。”这个要求（连同自然定律应

具有最大可能的逻辑简单性的要求）远比狭义相对性原理更为有力地限制了一切自然定律。



1931年，爱因斯坦和哈勃等天文学家在使用威尔逊山天文台的100英寸望远镜。这是当时世界上最大的望远镜。

这一系列的观念是以场作为一个独立的概念为基础的。对于S_2有效的情况被解释为一种重力场，而不问是否存在着产生这个重力场的质量。借助这一系列的观念，还可以理解为什么比起一般的场（例如存在电磁场时）的定律，纯重力场定律与广义相对论的观念有更为直接的联系。也就是说，我们有充分的理由假设，“没有场的”闵可夫斯基空间，表示自然定律中可能有的一种特殊情况，事实上这是可以想到的最简单的特殊情况。就其度量性质而言，这个空间的特性可由下列方式表示：

$$dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2$$

等于一个三维“类空”（space-like）截面上无限接近的两点（以单位标准长度量度）的空间间隔的平方（毕达哥拉斯定理），而dx4则是具有共同的（x_1、x_2、x_3）的两个事件的时间间隔——以适当的计时标准量度。这一切不过意味着将一种客观的度量意义赋予下面这个量

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - dx_4^2 \quad (1)$$

这点也不难借助洛伦兹变换来证明。从数学上来说，这一事实对应于下列条件：ds^2对于洛伦兹变换是不变的。

如果按照广义相对性原理的意义，令这个空间［参照方程式（1）］进行任意连续坐标变换，那么这个具有客观意义的量ds在新坐标系中即可表示为以下关系式

$ds^2 = g_{ik}dx_idx_k$ （1a）

上式中，要对等号右边指标i和k从11，12，…，44的全部组合求和。这里的g_{ik}项并不是常数，而是各个坐标的函数，它们由任意选定的变换来决定。但各个gik项也不是新坐标的任意函数，而是必须正好使形式（1a）经过四个坐标的连续变换仍能还原成形式（1）的这样一类函数。为了使这一点成为可能，函数g_{ik}必须满足一些普遍协变条件方程式，这些方程式是在广义相对论创立前的半个多世纪由黎曼导出的（“黎曼条件”）。依据等效原则，当函数g_{ik}满足黎曼条件时，（1a）就以普遍协变形式描述一种特殊的重力场。

由此可推论出：当黎曼条件被满足时，一般的纯重力场的定律必然被满足；但这个定律必然比黎曼条件要弱或限制较少。这样，纯重力场的定律实际上就可被完全决定，这个结果在这里不宜详细论证。

现在我们可以来思考，对空间概念要作多大的修正才能过渡到广义相对论去。依据经典力学以及狭义相对论，空间（时空）不依赖于物质或场。为了能描述充满空间且依赖于坐标的东西，必须首先设想时空或惯性系连同其度量性质都是已经存在的，否则描述“充满空间的东西”就没有意义了。[18]另一方面，根据广义相对论，与依赖于“充满空间的东西”相对立的空间是不能脱离前者而独立存在的。这样，一个纯重力场是可以用求解重力场方程式得到的g_{ik}（作为坐标的函数）来描述的。假如我们设想将重力场，也就是函数gik移除，剩下的就不是（1）型空间，而是绝对的一无所有了，并且也不是“拓扑空间”（topological space）。因为函数g_{ik}不仅描述场，同时也描述这种流形的拓扑与度量结构性质。由广义相对论的观点来判定，（1）型的空间并不是一个没有场的空间，而是g_{ik}场的一种特殊情况，对这种特殊情况，函数g_{ik}——对于所使用的坐标系而言，而坐标系本身并没有客观意义——具有不依

赖于坐标的值。一无所有的空间，即没有场的空间是不存在的。时空不能独立存在，只能作为场的结构性质而存在。

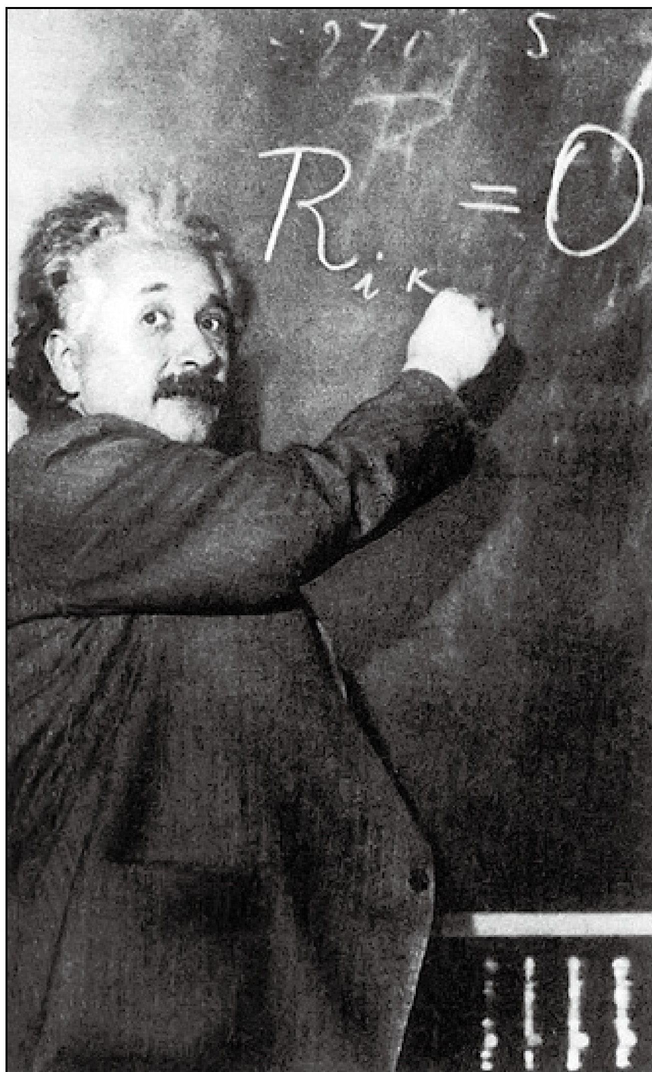
因此，笛卡尔认为一无所有的空间并不存在的见解与真理相去不远。假如仅仅从有质体来理解物理实在，那么上述观念看来确实是荒谬的。将场视为物理实在的表象这种观念，结合广义相对性原理，才能说明笛卡尔观念的真义所在："没有场的"空间是不存在的。

17　这个不精确的表达方式在这里或许已经足够了。

18　假如我们设想将充满空间的东西（例如场）移去，依据（1）式，度量空间仍然存在，这个度量空间还将确定引入其中的实验物体的惯性行为。

（3）广义的重力论

根据上文所述，以广义相对论为基础的纯重力场论已不难获得，因为我们可以确信，"没有场的"闵可夫斯基空间其度量如果与（1）式一致，那么必定满足场的普遍定律。而从这一特殊情况出发加以推广，就能导出重力定律，并且在推广过程中实际上可以避免任意性。至于理论上的进一步发展，广义相对性原理并没有十分明确地做出决定。在过往的数十年中，人们曾朝着各个方向进行探索，所有这些努力的共同点是将物理实在看成一个场，并且是由重力场推广而得的场，因此这个场的场定律是纯重力场定律的一种推广。经过了长期探索之后，对于这一推广，我相信我现在已经找到了最自然的形式了[19]，但我还无法判断这种推广的定律是否能经得起经验事实的考验。



爱因斯坦摄于1931年。当被问及他的智慧来源于哪里时，爱因斯坦答道："我并没有特殊的天赋，只是充满好奇。"

在前面的一般论述中，场定律的个别形式问题是次要的。目前的主要问题是，这里所设想的场论究竟能否达成其本身的目标；也就是说，这样的场论能否用场来透彻地描述物理实在（包括四维空间）。当前这一代物理学家都倾向于否定的回答。按照目前形式的量子论，这一代的物理学家认为，一个体系的状态是不能被直接规定的，只能通过对从该体系中获得的测量结果给予统计学的陈述来进行间接规定。目前流行的看法是，只有将物理实在的概念削弱之后，才能体现已由实验证实的自

然界的二重性（粒子性与波动性）。我认为，我们现有的知识还不能进行如此深远的理论否定；在相对性场论的道路上，我们不应半途而废。

19 这一推广的特点可以表述如下。重力场是由空虚的“闵可夫斯基空间”导出的，按照这项推导，这个具有函数g_{ik}的重力场必须具备由$g_{ik}=g_{ik}$（$g_{12}=g_{21}\ldots$）这个方程式确定的对称性质。广义的场与重力场类似，只是不具备这种对称性质。场定律的推导与在特殊情况下的纯重力的推导完全类似。

附录二

诺贝尔奖委员会给爱因斯坦的颁奖词

.诺贝尔奖委员会给爱因斯坦的颁奖词

瑞典皇家科学院诺贝尔物理学奖委员会主席阿雷纽斯教授致辞：

当今在世的物理学家中，恐怕没有谁的名字像阿尔伯特·爱因斯坦那样广为人知。人们的讨论主要集中在他的相对论上。这一理论与认识论有着本质的联系，一直是哲学界研究的热点。著名哲学家柏格森（Bergson）在巴黎对这一理论进行了批判，而其他哲学家则是全心全意地赞同这一理论，这已不是什么秘密。这一理论与天文学有关，正在接受严格的检验。

在本世纪1头十年，所谓的布朗运动（Brownian motion）引起了人们最强烈的兴趣。1905年，爱因斯坦创立了分子运动理论来解释这一现象，他得到了悬浮着固体颗粒的悬浮液的主要特性。分子运动理论以经典力学为基础，帮助人们解释了所谓的胶体溶液的性质，在已发展成为一大重要科学分支的胶体化学领域，这一问题一直被斯维德伯格、佩兰、塞格蒙蒂等其他科学家所研究。

爱因斯坦的第三方面研究是他对普朗克在1900年创立的量子理论的研究，爱因斯坦也因此获得了诺贝尔奖。量子理论认为，辐射能是由被称为“量子”的单个粒子组成的，就像物质是由原子组成的一样。普朗克因为量子理论获得了1918年的诺贝尔物理学奖，但由于这一非凡理论仍存在诸多缺陷，它在本世纪2头十年的中期一直处于停滞状态。爱因斯坦率先以他对比热和光电效应的研究走在了前面。1887年，著名的物理学家赫兹（Hertz）发现了光电效应。赫兹发现，连着火花间隙的电磁线圈被紫外光照射时，就有可能帮助产生火花。哈尔瓦克斯（Hallwachs）对这一有趣的现象进行了更深入的研究，他指出，在某

些条件下，带负电荷的物体，如薄金属片，在紫外线照射下会产生更强的效果：它们会失去负电荷，获得正电荷。1889年，勒纳德（Lénárd）解释说，这是因为电子以一定的速度从带负电荷的物体中发射出来。这种效应最不寻常的一面是，电子的发射速度与照射光的强度无关，光的强度只与电子的数量成正比；但是电子的速度随着光的频率而增加。勒纳德强调，这种现象与当时流行的观念是不一致的。

同时产生的现象是光致发光，也就是磷光和荧光。当光照射一个物体时，这个物体有时会发出磷光或荧光。由于光量子的能量随频率增加，所以一个给定频率的光量子只能产生一个较低频率的光量子，或者最多是相同频率的光量子，否则能量就会被创造出来。因此，磷光或荧光的频率比引起光致发光的光的频率低。这就是斯托克斯定律（Stokes Law），爱因斯坦用量子理论解释了它。

同样的，当一个光子被发射到薄金属片上时，它最多只能把它所有的能量给电子；一部分能量被用来把电子带到空气中，剩下的能量变成电子的动能。这适用于金属表层的电子。这样就可以计算出照射后金属的正电势。只要光子有足够的能量对电子做逸出功，电子就能离开金属飞到空中。因此，只有当光的频率大于一定的极限时，才会产生光电效应，无论光的强度如何。如果超过了极限，在一定频率下，光电效应就与光强度成正比。气体分子的电离也存在类似的情况，如果知道使气体电离的光的频率，就可以计算出电离电势。

爱因斯坦的光电效应定律已经被美国的密立根（Millikan）和他的学生们详细地检验过了并且已经通过检验了。由于爱因斯坦的研究工作，量子理论得以被更全面地完善，并在这方面诞生了一部伟大的著作，证明了它的非凡价值。正如法拉第定律（Faraday's Law）是电化学的基础一样，爱因斯坦的理论成了定量光化学的基础。3

1 指20世纪。——译者注

2 指20世纪。——译者注

3 1921年诺贝尔奖颁奖典礼于瑞典首都斯德哥尔摩举行，爱因斯

坦并未亲临领奖，组委会保留了他的奖项，并于1922年补颁奖项。——译者注

版权信息

书名：相对论

作者：(美) 阿尔伯特· 爱因斯坦著；李精益译.

出版社：广东科技出版社

出版时间：2020年12月

ISBN：978-7-5359-7586-7

版权所有·侵权必究

紫图书库 | 8029
大师经典 | 030

超越人类智识巅峰的物理学奇书，打开思维的尺度

你听过$E=mc^2$吧，是不是需要时间想想这些英文字母代表什么？
你听过“相对论”这个深奥的名词吧，是不是很想深入了解它的意思？
你听过这位白发凌乱、看似疯狂的天才爱因斯坦吧，是不是对他充满好奇？
他究竟是天赋异禀的奇才，还是站在巨人肩膀上的集大成者？

◎ 在飞驰的火车中扔出的石头是沿直线下落的吗？
◎ 当速度趋近于光速时，会发生什么？
◎ 当物体远离地表时，速度会更快？
◎ 狭义和广义的区别是什么？
◎ 光线会因太阳重力场而发生弯曲吗？
◎ 相对论也可以指导星际旅行？

当你和好朋友待在一起2小时，你感到像是过了1分钟；
但如果是待在高温的火炉旁，纵使只停留1分钟，
你却感到像是待了2小时——这就是相对论。

与伟大的灵魂深度对话，像爱因斯坦一样思考

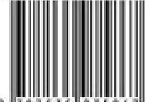
我想知道上帝是如何创造这个世界的。对于这个或那个现象、这个或那个元素的谱，我不感兴趣，我想知道的是他的思想，其他都是细节问题。

——阿尔伯特·爱因斯坦



紫图图书
我们策划精品畅销书

上架建议：畅销·科普
ISBN 978-7-5359-7586-7



定价：49.90 元